

Waarde van slimme netten

Welke waarde creëren slimme oplossingen
in het distributienetwerk?

Rapport



Waarde van slimme netten

Welke waarde creëren slimme oplossingen
in het distributienetwerk?

Rapport

Door: Timme van Melle, Lou Ramaekers en Wouter Terlouw

Datum: 7 november 2014

Projectnummer: INTNL15184

© Ecofys 2014 in opdracht van: Netbeheer Nederland

Samenvatting

Introductie – In Nederland bestaat een duidelijk en breed gedeeld streven naar meer duurzame energie en vermindering van broeikasgasemissies. De toename van het aandeel elektriciteit in de energiemix die met deze ambitie samenhangt, zal naar verwachting leiden tot grote investeringen in de benodigde netwerkcapaciteit voor het middenspanningsnet. Slimme netten, waarbij met behulp van fijnmazige informatie-uitwisseling vraag en aanbod tweezijdig op elkaar kan worden afgestemd, bieden potentie voor het beperken van de benodigde additionele netverzwaring.

Om meer helderheid te verschaffen over de eventuele meerwaarde van slimme netten bekijkt deze studie een tweetal bestaande en representatieve middenspanningsnetwerken in Nederland. De netwerkkosten bij enkel netverzwaring worden vergeleken met de kosten die gemoeid zouden zijn bij het toepassen van slimme oplossingen bij huishoudens. De vraag die daarbij beantwoord wordt luidt:

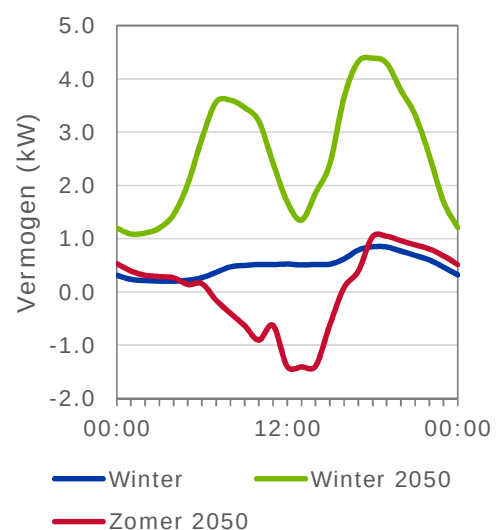
“Wat is de waarde van slimme oplossingen bij huishoudens indien deze in twee bestaande middenspanningsnetwerken worden toegepast om netverzwaringen te voorkomen?”



Figuur 1: Impressie van casus Steenwijk (links, © de Nationale Beeldbank, HdK) en casus Drechterland (rechts, © Jan Dijkstra).

Cases – Voor deze studie worden twee representatieve cases bestudeerd (Figuur 1). Casus Steenwijk is te typeren als “groen-kleinstedelijk”. Casus Drechterland is te typeren als “landelijk bereikbaar”. Casus Steenwijk kan tevens gezien worden als representatief voor grote delen van stedelijke gebieden in Nederland, waarbij grote steden uit een verzameling van zulke netwerken zijn opgebouwd.

Transitiescenario en vraagprofielen – Als gevolg van de gedefinieerde transitie naar een duurzamer energievoorziening neemt – zonder slimme oplossingen – de gelijktijdige piekvraag per huishouden toe van 0,9 kW naar 4,4 kW in 2050. Figuur 2 toont de dagen waarop de piekvraag van een extreem jaar valt.

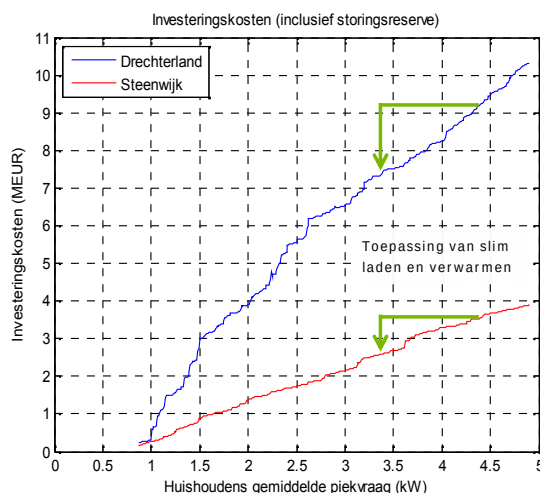


Figuur 2: Huidige piekvraag en toekomstige piekvraag (winter en zomer)

In de winter vindt de piek plaats op zeer koude dagen. Het vraagprofiel wordt dan gedomineerd door de elektriciteitsvraag van warmtepompen en elektrische auto's. In de zomer zorgen zonnepanelen voor een substantiële terugleverpiek, maar deze blijft minder groot dan de benodigde capaciteit in het winterseizoen.

Netwerkinvesteringen – De benodigde netwerkkosten om de verhoogde piekvraag te leveren zijn geanalyseerd met behulp van een load flow model. Op basis van het gevraagde vermogen en kengetallen voor netinvesteringen is een kostencurve gecreëerd die de relatie tussen de piekvraag van een gemiddeld huishouden en de kosten voor netinvesteringen visualiseert (Figuur 3). Hieruit blijkt dat de verhoogde piekvraag tot een significante investering in netverzwaring leidt. De hoogte hiervan verschilt sterk per casus. Deze zijn circa 740 €/kW per huishouden in Drechterland, en circa 204 €/kW per huishouden in Steenwijk. De verschillen tussen de twee cases worden onder andere veroorzaakt door de huidige ruimte in het netwerk en de bebouwingsdichtheid in het gebied.

Slimme oplossingen – Verschillende slimme oplossingen zijn geïnventariseerd op hun toepasbaarheid in de cases en kosteneffectiviteit waarmee zij, met verschuiving van de vraag, de piekvraag van huishoudens kunnen verlagen. Het slim laden van elektrische auto's en het afvlakken van de vraag voor warmtepompen op zeer koude dagen lijken de meest effectieve en efficiënte oplossingen te zijn voor het verlagen van de piekvraag in de gekozen cases. Toepassing van deze oplossingen resulteert in 2050 in een piekreductie van circa 1 kW (Figuur 3), gelijk aan ~25%. De piekvraag daalt daarmee van 4,4 kW naar 3,4 kW. Gebruik van batterijen voor elektriciteitsopslag is, gelet op de algemene trend van de kosten van netverzwaringen in de gekozen cases, voorlopig nog niet rendabel op basis van de besparingen in het middenspanningsnetwerk. Bij bestudering van het laagspanningsnet is gebleken dat slimme oplossingen niet de mate van piekreductie kunnen opleveren die netverzwaring voorkomt.



Figuur 3: Kostencurve voor Steenwijk en Drechterland. De groene pijl visualiseert de piekreductie als gevolg van slimme oplossingen.

Resultaten – Op basis van de kostenbesparingen op netinvesteringen en additionele kosten van slimme oplossingen zijn de financiële voordelen van slimme netten bepaald voor de netbeheerder van het middenspanningsnetwerk (

Tabel 1). Het toepassen van slim laden en slim verwarmen creëert waarde voor slimme netten voor beide cases in nagenoeg alle scenario's. Dit is mogelijk door de verwachte kostendaling van slimme oplossingen. In Steenwijk leveren de slimme oplossingen een jaarlijkse besparing op van € 24.000 in 2050. Dit komt overeen met een besparing van circa € 5 per huishouden per jaar. In Drechterland leveren de slimme oplossingen een jaarlijkse besparing op van € 80.000 in 2050. Dit komt overeen met een besparing van circa € 23 per huishouden per jaar. Voor beide cases is dit ongeveer 10% van de verwachte additionele kosten.

Tabel 1: Samenvatting van de additionele kosten (€/jaar) per huishouden voor de conventionele aanpak en de slimme aanpak voor de verschillende cases en scenario's.

Jaar	Casus Steenwijk (€/jaar/huishouden)			Casus Drechterland (€/jaar/huishouden)		
	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing
2020	13	14	-1	73	67	6
2030	25	22	3	114	102	12
2050	59	54	5	216	193	23

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de meest gevoelige aanname de effectiviteit is van de slimme oplossingen, oftewel de piekverlaging die bereikt kan worden met een bepaalde investering in slimme netten. In het geval van Steenwijk brengt een daling van 30% van deze parameter de waarde van slimme netten tot nul terug. In Drechterland kan deze daling 70% bedragen.

Conclusies – In de gekozen cases betalen slimme oplossingen zich terug door een besparing op netverzwaringen. Om de volledige waarde van slimme oplossingen aan het gebruik van netten te bepalen moeten ook andere effecten, zoals minder benodigde opwekcapaciteit, worden meegenomen. Het is waarschijnlijk dat deze het positieve effect verder zullen vergroten. Omdat in deze studie de veranderingen in de niet-huishoudelijke vraag niet zijn meegenomen zal de werkelijke toename van de piekvraag in het netwerk en de daarmee samenhangende investering waarschijnlijk hoger zijn, en de besparingen dus groter.

Om de uitkomsten van deze studie op te schalen naar het nationale niveau zal dit moeten worden meegenomen, en zal een groter aantal cases bestudeerd moeten worden, die gezamenlijk representatief zijn voor heel Nederland.

Al met al leidt de energie-transitie tot een veranderend vraagprofiel naar elektriciteit bij huishoudens, wat fors meer variatie vertoont op uurs-, dag- en seizoensbasis. Om het hoge niveau van leveringszekerheid in Nederland te behouden zullen de Nederlandse netbeheerders zich hier op moeten voorbereiden. Op basis van deze studie concluderen wij dat het toepassen van slimme oplossingen op lokaal niveau een kostenefficiënt onderdeel kunnen zijn van de aanpak. Een belangrijke voorwaarde hiervoor is dat de rollen binnen het energiemarktmodel in de toekomst worden vastgesteld op een wijze die het de gezamenlijke spelers toelaat om deze waarde zo efficiënt mogelijk te ontsluiten.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Leeswijzer	1
2	Reikwijdte van de studie	2
2.1	Slimme netten	2
2.2	Netwerk	2
2.3	Kosten	3
2.4	Comfort	4
3	Methodologie	5
3.1	Cases	5
3.2	Transitiescenario	6
3.3	Vraagprofielen	6
3.4	Netwerkmodellering	7
3.5	Slimme oplossingen	8
3.6	Kostenanalyse	8
4	Cases	10
4.1	Steenwijk (bebouwde kom)	11
4.2	Drechterland (landelijk)	11
5	Transitiescenario	14
6	Vraagprofielen	15
6.1	Huidig basisvraagprofiel	15
6.2	Toekomstig basisvraagprofiel	15
6.3	Warmtepomp profiel	16
6.3.1	Achtergrond: Vraagprofielen van warmtepompen	16
6.3.2	Aannames voor deze studie	19
6.4	Elektrische auto profiel	23
6.5	Zon-PV profiel	24
6.6	Toekomstig vraagprofiel	24
6.7	Slim toekomstig vraagprofiel	26
6.8	Overige vraagprofielen	26
7	Netwerkmodellering	27
7.1	Piekvraag van huishoudens	27
7.2	Gelijktijdigheid	27
7.3	Storingsreserve	28
7.4	Netuitbreidingen	28
7.5	Netverliezen	29

8	Slimme oplossingen	30
8.1	Selectiecriteria	30
8.2	Beschrijving gekozen slimme oplossingen	32
8.2.1	Slim laden	32
8.2.2	Warmtepomp sturing	34
8.2.3	Elektriciteitsopslag	36
8.2.4	Overzicht	37
8.3	Effecten van slimme oplossingen buiten de scope van het onderzoek	37
8.3.1	Opwekcapaciteit	37
8.3.2	Hoogspanningsnetwerk	38
8.3.3	Achter de meter	38
8.3.4	Realisatietijd van netverzwaringen	38
9	Kosten	39
9.1	Kosten voor netwerkaanpassingen	40
9.1.1	Drechterland	41
9.1.2	Steenwijk	42
9.1.3	Laagspanningsnet	43
9.2	Kosten voor slimme technologieën	43
9.3	Kosten voor netwerkaanpassingen en slimme technologieën	45
10	Uitkomsten	47
10.1	Vraagprofielen	47
10.2	Kostenvergelijking	47
10.2.1	Drechterland	48
10.2.2	Steenwijk	49
10.2.3	Samenvatting	49
10.3	Gevoeligheidsanalyse	50
10.3.1	Vraagprofielen	50
10.3.2	Kosten	51
11	Conclusies	53
12	Bronnen	55
	Bijlage I: Beschrijving MATPOWER	57
	Bijlage II: Netwerk Steenwijk	59
	Bijlage III: Netwerk Drechterland	60
	Bijlage IV: Berekening netverliezen	61
	Bijlage V: Gevoeligheidsanalyse	62

1 Inleiding

In Europa en in Nederland is al meerdere jaren sprake van een duidelijke en breed gedeelde ambitie voor duurzame energie en de verlaging van broeikasgasemissies. Dit moet onder meer leiden tot een gestage groei van de toepassing van zonnepanelen op huizen en windturbines. Om ook de uitstoot van vervoer en verwarming van huizen omlaag te brengen is bovendien een sterke groei gewenst van het aandeel elektrische auto's en warmtepompen. Deze ambities zijn opnieuw breed onderschreven in het Energieakkoord¹ dat in september 2013 tot stand kwam.

Naast duurzaamheid worden betaalbaarheid en de betrouwbaarheid als belangrijke randvoorwaarden gezien waaraan het huidige en toekomstige energiesysteem moet voldoen. In de meeste scenario's neemt het aandeel elektriciteit in de energiemix toe. De verwachting is dat dit grote investeringen in opwekcapaciteit en netwerkcapaciteit zal vragen. Van deze netwerkinvesteringen wordt verwacht dat rond de 70% in de distributienetten zal liggen.² De vraag die zich aandient is hoe groot die extra investeringen zijn en of deze kosten op een slimme manier zouden kunnen worden beperkt.

De term slimme netten wordt vaak genoemd in verband met deze investeringen. Daarmee wordt bedoeld dat, met behulp van fijnmazige informatie-uitwisseling, vraag en aanbod tweezijdig op elkaar kunnen worden afgestemd. Het effect zou kunnen zijn dat de behoefte aan uitbreiding van de infrastructuur achterwege kan blijven of op zijn minst kleiner is. Veel internationale en nationale rapporten concluderen dat additionele netwerkcapaciteit daarmee beperkt kan blijven, waarmee kosten worden bespaard.³ De kosten-batenberekeningen die aan deze rapporten ten grondslag liggen zijn noodzakelijkerwijs gebaseerd op algemene en vaak generieke inschattingen van de kosten en baten van slimme netten. Er is op dit moment geen studie beschikbaar die op basis van bestaande situaties en werkelijke omstandigheden berekent welke waarde de slimheid heeft die aan netten wordt toegevoegd.

Deze studie beoogt deze lacune te vullen. Het bekijkt een tweetal bestaande en representatieve middenspanningsnetwerken in Nederland en vergelijkt, bij een gegeven ontwikkeling van duurzame technologieën die in lijn is met de huidige ambities, de netwerkkosten bij enkel netverzwaring met de kosten die gemoeid zouden zijn bij het toepassen van slimme oplossingen. De vraag die daarbij beantwoordt zal zijn: "Wat is de waarde van slimme oplossingen indien deze in twee bestaande middenspanningsnetwerken worden toegepast om netverzwaringen te voorkomen?"

1.1 Leeswijzer

Sectie 2 en 3 beschrijven de reikwijdte en gevolgde methodologie van deze studie. Secties 4 tot en met 9 zijn een uitwerking van de methodologie voor de cases, het transitie scenario, de vraagprofielen, de netwerkmodellering, de slimme oplossingen en de kosten. In Sectie 10 en 11 worden de uitkomsten en conclusies van deze studie gepresenteerd.

¹ SER (2013) Energieakkoord voor duurzame groei

² DNV GL (2014) Integration of renewable energy in

Europe http://ec.europa.eu/energy/renewables/doc/201406_report_renewables_integration_europe.pdf

³ CE Delft (2012) Maatschappelijke kosten en baten van Intelligente Netten, EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid

2 Reikwijdte van de studie

Dit hoofdstuk geeft aan binnen welke kaders dit rapport is opgesteld. Het zal een definitie geven van slimme netten, beschrijven welke delen van het elektriciteitsnetwerk worden bestudeerd en welke kosten worden meegenomen bij het berekenen van de “waarde van slimme netten”.

2.1 Slimme netten

In deze studie wordt het volgende onder slimme netten verstaan: “Het toevoegen van intelligentie in het distributiesysteem en bij eindgebruikers van het netwerk om de lokale energie opwekking en vraag zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen op basis van de mogelijkheden en kosten binnen het energiesysteem.” Deze studie richt zich op de toepassing van deze slimme netten, of beter gezegd “slimme oplossingen”, om investeringen in netverzwaringen in het distributienet gedeeltelijk te voorkomen of uit te stellen en daarmee de kosten van het beheer van deze netwerken zo laag mogelijk te houden.

Als focus voor deze studie is gekozen voor de ontwikkelingen die worden geambieerd en al plaatsvinden bij huishoudens. Hiervoor is gekozen omdat binnen deze groep de toepassing van slimme oplossingen de grootste voordelen kan brengen. Een belangrijke toevoeging van slimme netten is namelijk het mogelijk maken van tweeweg communicatie met grote hoeveelheden kleine gebruikers. Bij grootverbruikers wordt vraagsturing en tariefvariatie reeds in een bepaalde mate toegepast.

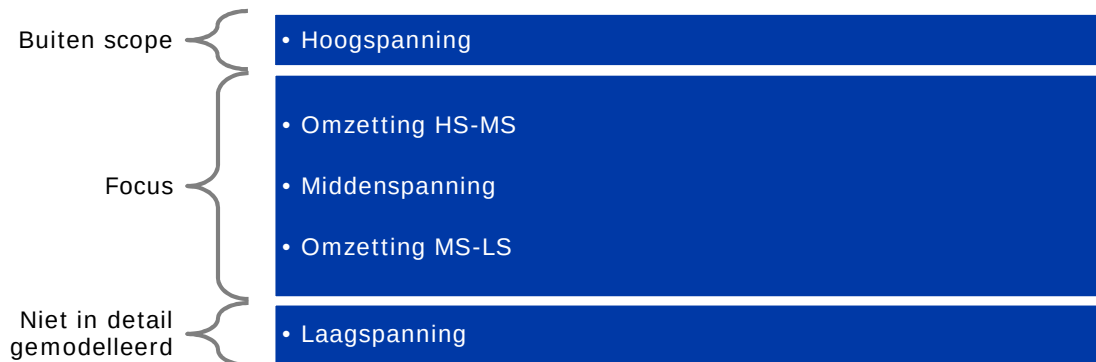
De beperking van deze aanpak is dat de groei van de piekvraag bij huishoudens in de toegepaste methodologie ook met vraagrespons binnen de huishoudens moet worden opgevangen. Dit is een beperking in de mogelijkheden van slimme oplossingen.⁴ Dit betekent dat er wellicht additionele synergie mogelijk is binnen de middenspanningsnetwerken die in dit rapport niet wordt meegenomen.

De vraag in hoeverre gebruikers kiezen voor het al dan niet toepassen van slimme oplossingen valt buiten de scope van deze studie.

2.2 Netwerk

De focus in deze studie ligt bij de lokale distributienetwerken in het middenspanningsnet (MS) (Figuur 4). Het middenspanningsnet en de daaraan verbonden transformatoren zijn daarom gedetailleerd in kaart gebracht. Naast de technische capaciteit van het netwerk zijn ook de kosten van de verschillende componenten benoemd.

⁴ Er wordt bijvoorbeeld niet gekeken naar de mogelijkheid om zonnepanelen bij bedrijven te gebruiken om in de energievraag van huishoudens te voorzien. Verder is het zo dat bedrijven en huishoudens meestal niet op hetzelfde laagspanningsnet zijn aangesloten, waardoor het gevraagde vermogen op het middenspanningsnet niet zal afnemen.



Figuur 4: Focus van huidige studie

Het hoogspanningsnet (HS) bevindt zich buiten de scope van deze studie. De laagspanningsnetten (LS) zijn niet in detail gemodelleerd, maar er is wel een beschrijving gegeven van de mogelijke implicaties van de voortschrijdende energietransitie op de laagspanningsnetten.

2.3 Kosten

Dit onderzoek richt zich op de kosten die gemaakt worden door de beheerders van het distributienet voor het distribueren van elektriciteit tussen het hoogspanningsnetwerk en huishoudelijke eindgebruikers. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de investerings- en operationele kosten die gemoeid zijn met de verzwarende van het net zonder slimme oplossingen, en de investerings- en operationele kosten die gemoeid zijn met de verzwarende van het net bij het toepassen van slimme oplossingen, inclusief de investerings- en operationele kosten die gemoeid zijn met deze slimme oplossingen zelf.

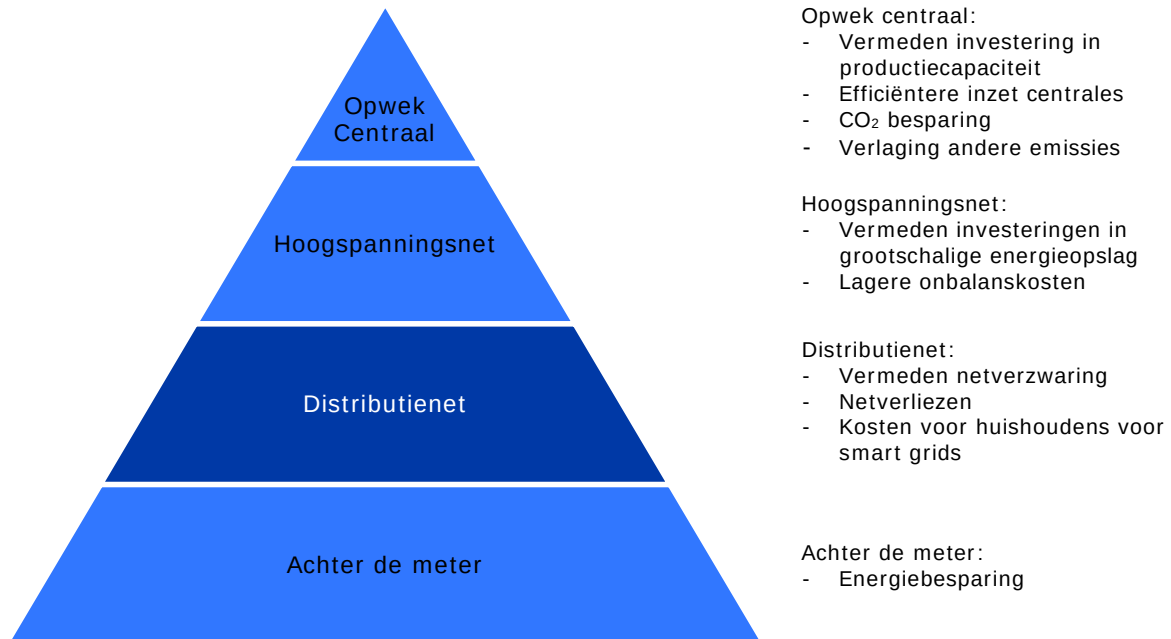
Dit betekent dat de waarde die gecreëerd wordt met deze zelfde slimme oplossingen in andere onderdelen van het energiesysteem (zie Figuur 5) niet is meegenomen in de berekeningen van deze studie. Als de flexibiliteit die door deze mogelijkheden ontsloten wordt optimaal in het energiesysteem wordt gebruikt, kan met geen of beperkte additionele investeringen, veel additionele waarde kunnen gecreëerd.⁵ Dit zal slimme oplossingen aantrekkelijker maken dan de cijfers in dit rapport weergeven.

De volgende kosten zullen wel worden geanalyseerd:

- Kosten voor netverzwaring – Dit zijn de kosten die gemoeid zijn met investeringen in - en operationele kosten van - fysieke netten.
- Kosten van netverliezen – Dit zijn de kosten die gemoeid zijn met het inkopen van de elektriciteit die verloren gaat bij de distributie van elektriciteit.

⁵ Zo kan verlaging van de piekvraag leiden tot een afname van benodigde productiecapaciteit en centrale opslagsystemen. Deze worden kort behandeld in paragraaf 9.1.3, maar in deze studie niet nader gekwantificeerd.

- Kosten voor slimme technologie – Dit zijn de kosten (investeringen en operationele kosten) die gemoeid zijn met het toepassen van slimme oplossingen. Ook de kosten die huishoudens in bepaalde gevallen moeten maken om slimme oplossingen mogelijk te maken worden meegenomen.



Figuur 5: Kosteneffecten van slimme netten

2.4 Comfort

Er wordt aangenomen dat voor de eindgebruiker de baten van de netten gelijk blijven. Dit kan alleen als naar oplossingen wordt gezocht die de bovengenoemde kosten kunnen verlagen zonder dat aanpassingen in de functionele vraag van huishoudens nodig zijn. We zoeken dus oplossingen waarbij bewoners hun gedrag niet of minimaal hoeven aan te passen, altijd zonder verlies van comfort. Dit houdt bijvoorbeeld in dat het op geen enkel moment (in de winter) in huis kouder zal zijn dan bij conventionele oplossingen.⁶

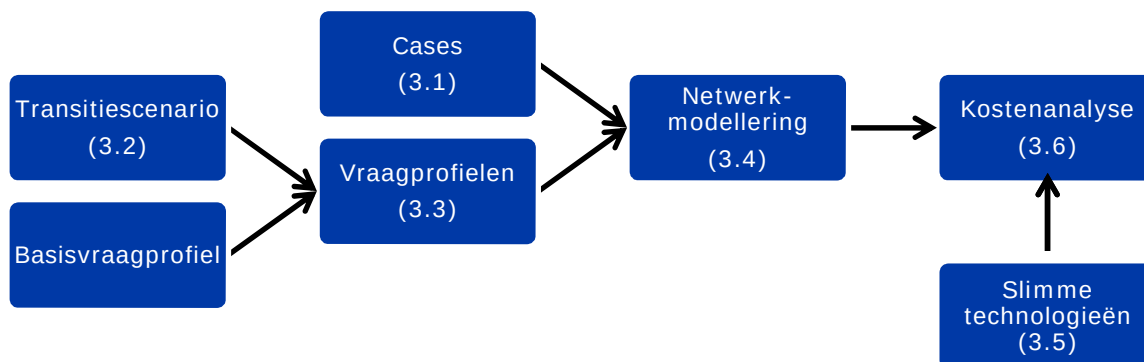
Om twee redenen is voor deze aanpak gekozen. Ten eerste is de kans dat slimme oplossingen door gebruikers geaccepteerd worden groter als zij hun gedrag niet hoeven aan te passen. Ten tweede zijn de resultaten van dit rapport objectiever omdat er geen geldbedrag gekoppeld hoeft te worden aan verlies van comfort.

⁶ In bepaalde gevallen zal de temperatuur wel hoger zijn dan in de conventionele oplossing, echter nooit hoger dan de nagestreefde dagtemperatuur. Geen comfortverlies wordt aangenomen als de temperatuur in bijvoorbeeld de woonkamer van een huis in plaats van 17 graden naar 20 graden wordt verhoogd, omdat er van wordt uitgegaan dat 20 graden de meest gewenste temperatuur is, en daar enkel vanwege kostenoverwegingen van wordt afgeweken.

3 Methodologie

Het doel van deze studie is om de kosten en baten van slimme netten in kaart te brengen. Dit hoofdstuk zet uiteen welke methodologie hierbij is toegepast. Figuur 6 geeft een overzicht van de stappen in de methodologie.

Het projectteam heeft een kosten-batenanalyse uitgevoerd voor twee bestaande netwerken in Nederland. Het selectieproces voor deze cases wordt beschreven in Sectie 3.1. Om de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag tot 2050 in kaart te brengen is er een transitiescenario gedefinieerd, zoals beschreven in Sectie 3.2. Op basis van dit transitiescenario zijn de vraagprofielen van een doorsnee huishouden samengesteld. Deze vraagprofielen beschrijven de huidige en toekomstige energievraag op uurbasis, voor een extreem koud jaar. De wijze waarop deze vraagprofielen zijn vastgesteld, wordt beschreven in Sectie 3.3. Deze vraagprofielen vormen ook de basis voor de toepassing van slimme oplossingen op de piekvraag van huishoudens. De geselecteerde cases en vraagprofielen vormen de input van de netwerkberekeningen in Sectie 3.4. De selectie van slimme oplossingen wordt behandeld in Sectie 3.5. Uiteindelijk worden de bevindingen samengebracht in een kostenanalyse die wordt behandeld in Sectie 3.6.



Figuur 6: Methodologie

3.1 Cases

Voor het bestuderen van de effecten van slimme technologieën op het elektriciteitsnet zijn in overleg met de opdrachtgever, de stuurgroep en de klankbordgroep, twee cases geselecteerd. Er is gekozen om een case te kiezen die getypeerd kan worden als “bebouwde kom” en een case die getypeerd kan worden als “landelijk”.

De selectie van de cases is op de volgende criteria gebaseerd:

- Mate waarin de casus representatief is voor overig Nederland – Het bestuderen van een specifiek netwerk levert als voordeel op dat op basis van de werkelijkheid en in meer detail kostenberekeningen gedaan kunnen worden. Een nadeel is dat de uitkomsten per case zullen verschillen en dus niet als vanzelf een bredere conclusie ondersteunen. Om deze reden is er scherp op gelet dat de gekozen distributienetwerken een topologie en capaciteit hebben die op veel plekken in Nederland voorkomt.
- Aanwezigheid van benodigde informatie – Bij selectie van de cases is gelet op de beschikbaarheid van gerelateerde informatie over het netwerk, het verbruik achter het netwerk en andere basisinformatie.

De cases en het selectieproces worden nader beschreven in Sectie 4.

3.2 Transitiescenario

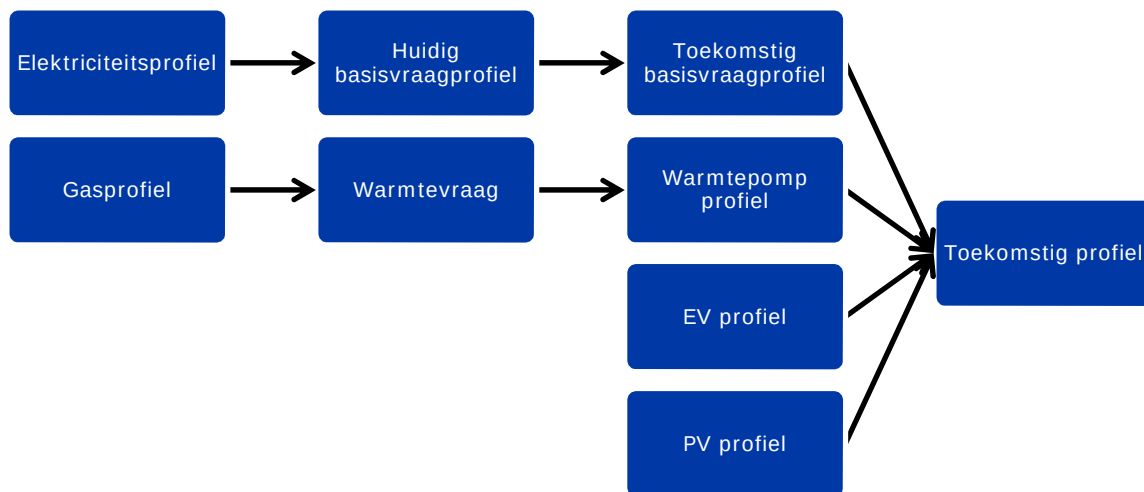
De vereiste uitbereidingen van het elektriciteitsnet en daarmee de mogelijke effecten van slimme oplossingen zijn sterk afhankelijk van de ontwikkeling van het gebruik van zonnepanelen, warmtepompen, elektrische auto's en windmolens. Het doel van deze studie is om de kosten te bepalen binnen een scenario waarin rekening gehouden wordt met Nederlandse en Europese beleidsdoelstellingen en voornemens. Daarvoor is een transitiescenario gekozen die nauw verbonden is met het bestaande en voorgenomen beleid binnen Nederland. Voor de implementatiegraad en -snelheid is één enkele situatie geschetst voor 2050. Op basis van dit eindbeeld is vervolgens een transitie voor 2020 en 2030 samengesteld. Er is gekozen voor een scenario dat herkenbaar is en breed gedragen wordt. Een beschrijving van het transitiescenario wordt gegeven in Sectie 5.

3.3 Vraagprofielen

Om de toekomstige eisen aan het netwerk vast te stellen en de mogelijkheden te onderzoeken die aanpassing van vraag of aanbod biedt, is het nodig om de vraagprofielen van huishoudens voor de toekomst vast te stellen. Dit gebeurt op basis van de aannames met betrekking tot het transitiescenario.

De vraagprofielen beschrijven het hele jaar met een resolutie van één uur. De vraagprofielen voor het transitiescenario zijn gecreëerd door verschillende profielen te combineren (zie Figuur 7). De verschillende vraagprofielen worden beschreven in Sectie 6. Een variëteit aan technologieën kan van invloed zijn op de toekomstige vraag, zoals warmtepompen, micro-WKK's, airconditioning, elektrische vervoersmiddelen, zonnepanelen, etc. In deze studie is er voor gekozen om alleen warmtepompen, elektrische auto's en zonnepanelen daadwerkelijk te variëren en de effecten daarvan te onderzoeken. Voor deze technologieën is gekozen omdat verwacht wordt dat deze een groot effect zullen hebben op de capaciteitseisen van het netwerk.

Voor de samenstelling van de toekomstige vraagprofielen is gebruik gemaakt van de huidige stand van de techniek met betrekking tot warmtepompen, elektrische auto's en zonnepanelen.



Figuur 7: Combinatie van verschillende profielen leidt tot het toekomstig profiel

3.4 Netwerkmodellering

Zoals eerder gezegd richt deze zich op het middenspanningsdeel van het distributienet. Voor de modellering van het netwerk is gebruik gemaakt van de Matlab module MATPOWER⁷ waarmee netbelastingen kunnen worden doorgerekend.⁸

In het model wordt de geografische opbouw van het netwerk bij de gekozen cases ingevoerd. Ook de bijbehorende capaciteiten van de kabels en de transformatoren worden opgenomen. Op de HS/MS knooppunten wordt een virtueel conventioneel vermogen gemodelleerd. Duurzame bronnen binnen het gebied van de case worden zowel gemodelleerd binnen de vraagprofielen (zon-PV) als aparte generatoren (windturbines). De gevraagde vermogens worden gegeven voor elk MS/LS knooppunt. De in deze studie berekende vraagprofielen worden geschaald op basis van het maximaal gevraagde vermogen gerapporteerd voor de MS/LS knooppunten.

Het model geeft vervolgens het vermogen voor elke kabel en transformator in het elektriciteitsnet. Vergelijking van dat vermogen met maximale belasting levert inzicht in de knelpunten van het netwerk onder een gegeven belasting. De knelpunten bepalen voor elke specifieke voorspelde toekomstige piekvraag welke transmissiecapaciteiten verhoogd moeten worden, en in welke mate. De netwerkmodellering wordt uitgebreider beschreven in Sectie 7.

⁷Zimmerman, Murillo-Sánchez, and Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011. (Digital Object Identifier: 10.1109/TPWRS.2010.2051168).

⁸ Een beschrijving van MATPOWER wordt gegeven in Bijlage I: Beschrijving MATPOWER.

3.5 Slimme oplossingen

Er zijn vele mogelijke slimme oplossingen waarmee de belasting van het distributienetwerk omlaag gebracht kan worden. Om de meest relevante en veelbelovende oplossingen te selecteren, zijn eerst de oplossingen in kaart gebracht waarvan verwacht wordt dat ze in de komende tien jaar een rol kunnen gaan spelen in de praktijk. Uit deze lijst zijn drie oplossingen geselecteerd op basis van de volgende criteria:

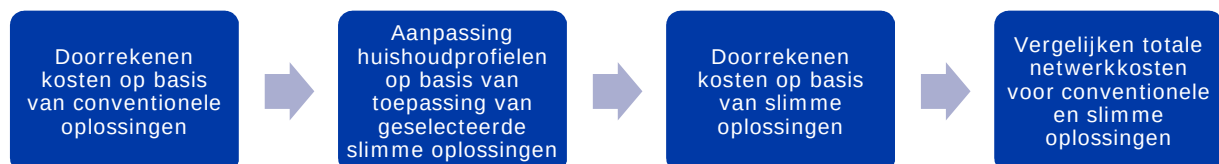
- Jaarlijkse kosten per vermeden netverzwaring – Voor het verlagen van de totale kosten is het belangrijk dat de kosten van de toegepaste slimme oplossing lager zijn dan de vermeden netwerkkosten. Om deze reden is het belangrijk om de meest kostenefficiënte oplossingen te kiezen.
- Toepasbaarheid in de gekozen cases – Niet alle slimme oplossingen zijn toepasbaar op elk capaciteitsprobleem. De slimme oplossingen die worden toegepast moeten geschikt zijn om de problemen die in de gekozen netwerkgebieden verwacht worden, op te lossen.
- Readiness – Oplossingen die op middellange termijn mogelijk zijn hebben een voorkeur voor toepassing. Dit wordt afgeleid uit de mate waarin oplossingen zijn toegepast in bestaande pilots en praktijktesten.

In de slimme variant van de cases zullen deze oplossingen worden toegepast om de jaarlijkse kosten van het netwerk te minimaliseren. De inventarisatie en selectie van oplossingen zijn beschreven in Sectie 8.

3.6 Kostenanalyse

In de kostenanalyse staan de kosten centraal die gemoeid zijn met het gebruiken en in stand houden van het distributienetwerk (Figuur 8). De jaarlijkse kosten zijn leidend omdat het hiermee mogelijk is om ook operationele kosten en eventuele jaarlijkse uitgaven en misgelopen inkomsten⁹ van huishoudens mee te nemen. De volgende kosten zullen berekend worden:

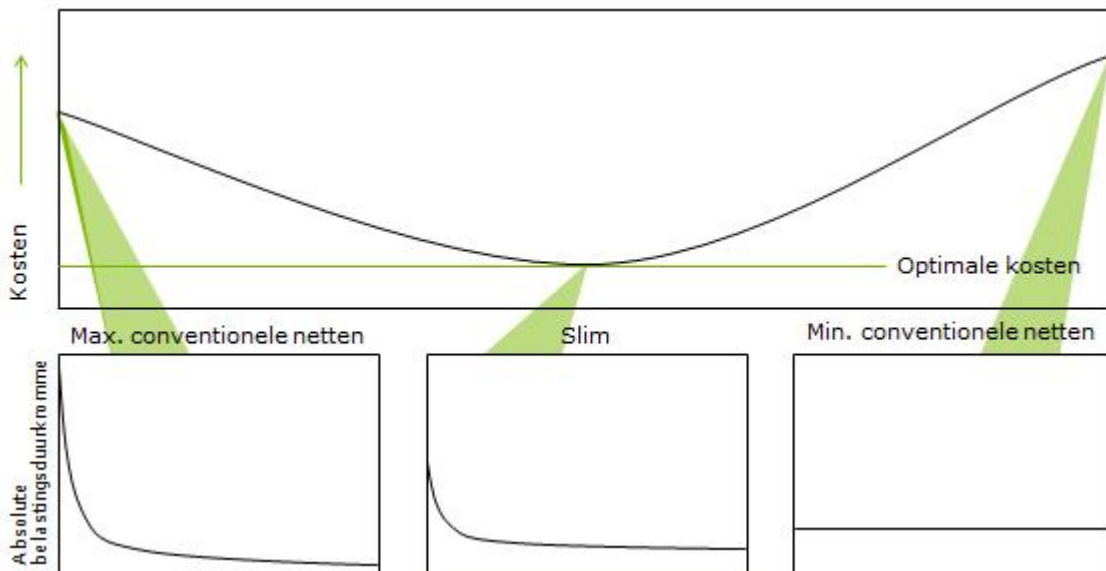
- Kosten conventionele aanpak – Hierbij zullen de kosten worden berekend voor de aanpassingen aan het netwerk die nodig zijn om het toenemende aantal warmtepompen, elektrische auto's, zonnepanelen en windturbines te kunnen faciliteren, zonder dat getracht wordt de vraagpatronen aan te passen.
- Kosten slimme netten – Dit zijn de kosten zoals die naar verwachting zullen worden gemaakt als er gebruik wordt gemaakt van slimme oplossingen in het netwerk, waardoor netverzwaring kan worden uitgesteld of afgesteld. Hierbij wordt verwacht dat de kosten voor netverzwaring lager zullen zijn, terwijl de kosten voor de slimme oplossingen bijgeteld moeten worden.



⁹ Een voorbeeld van misgelopen inkomsten is het niet kunnen leveren van zonne-energie omdat dit niet binnen een slimme oplossing past.

Figuur 8: Kostenberekeningen

Er wordt geprobeerd om de slimme oplossingen optimaal toe te passen (zie Figuur 9). In het bovenste diagram staat schematisch aangegeven welke kosten verwacht worden bij verschillende maten van intelligentie van het net. Daaronder worden ter illustratie verschillende belastingduurkrommen¹⁰ gegeven die bij deze situatie zouden passen.¹¹



Figuur 9: Optimale inzet van slimme oplossingen

In de situatie waarbij enkel conventionele aanpassingen plaatsvinden, wordt het netwerk verder verzwakt naarmate de piek toeneemt door de energietransitie. Hierbij wordt geen poging ondernomen om de vraag te beïnvloeden.

Bij het toepassen van slimme oplossingen wordt de vraag niet als een gegeven gezien, maar wordt technologie gebruikt om de piekvraag te verlagen. Dit zal voornamelijk gebeuren door vraag te verschuiven naar een ander moment, zonder de functionele vraag van de huishoudens te veranderen.

De toepassing van slimme oplossingen zorgt voor een afname in de kosten, doordat er minder netverzwaring nodig is. Er zijn echter ook kosten verbonden aan het toepassen van slimme oplossingen. De kosten verbonden aan het gebruik van slimme technologieën worden beschreven in Sectie 8 en 9. Zolang de alternatieve kosten lager zijn dan de conventionele kosten, is het financieel optimaal om slimme oplossingen te blijven toepassen. Naarmate de kosten van toe te passen oplossingen toenemen, wordt het minder waarschijnlijk dat de bespaarde netwerkkosten de kosten overstijgen. Ook wordt het moeilijker en kostbaarder om vraag verder te verschuiven naar mate een vraagprofiel vlakker wordt. Op het moment dat de jaarlijkse kosten van de slimme oplossingen hierdoor hoger wordt dan netverzwaringen is de optimale inzet van slimme maatregelen bereikt. Voorbij dit punt zijn netverzwaringen weer de meest kosteneffectieve oplossing.

¹⁰ Een belastingduurkromme geeft de uurlijkse belasting van het net weer, in dit geval voor een jaar. De uren zijn gerangschikt van hoogste belasting naar laagste belasting. Dit geeft een goed beeld van de intensiteit waarmee het netwerk wordt benut.

¹¹ Hierbij zijn alle belastingen (levering of teruglevering) absoluut gemaakt. In de toekomst kan het voorkomen dat op bepaalde momenten meer wordt teruggeleverd dan geleverd.

4 Cases

In overleg met de opdrachtgever, de stuurgroep en de klankbordgroep, zijn een tweetal cases geselecteerd op basis van de vooraf opgestelde selectiecriteria (zie Sectie 3.1). Casus Steenwijk vertegenwoordigt de bebouwde kom, casus Drechterland vertegenwoordigt een landelijk gebied. Tabel 2 toont de score van de cases op de vooraf vastgestelde criteria. Zowel Steenwijk als Drechterland zijn representatief voor overig Nederland. Steenwijk is te typeren als “groen-kleinstedelijk”. Gelijksortige netdelen komen meer dan 600 maal in Nederland voor.¹² Tevens kan casus Steenwijk gezien worden als representatief voor stedelijke gebieden. Grote delen van steden zijn in feite een combinatie van middenspanningsnetwerken vergelijkbaar met het netwerk in Steenwijk. Drechterland is te typeren als “landelijk bereikbaar”. Dit type netwerk komt 1500 keer in Nederland voor. Beide cases zijn goed te modelleren en de benodigde informatie was snel beschikbaar.¹³

Tabel 2: Geselecteerde cases

	Steenwijk	Drechterland
Mate waarin de casus representatief is voor overig Nederland	+	++
Aanwezigheid van benodigde informatie	++	+

De netwerkstructuur en de eigenschappen van de netwerkcomponenten zijn beschikbaar gesteld in bestanden in het Vision format. Vision is een programma voor netwerk analyse en wordt gebruikt bij netbeheerders. De Vision bestanden zijn vervolgens geëxporteerd en geconverteerd naar het MATPOWER format. MATPOWER wordt in deze studie gebruikt om de netwerkberekeningen uit te voeren (zie Sectie 7).

De netten beschreven in de twee cases zijn radiaal aangelegd, waarbij de meeste uiteinden van de strengen elkaar ontmoeten. Hierdoor ontstaat een ringvormige structuur. Ergens in de ring is een netopening aanwezig: er ontstaat een radiaal bedreven ringvormige structuur. Op enkele plaatsen kunnen wel korte uitlopers aanwezig zijn.

Omdat in deze studie alleen de vraagprofielen voor huishoudens voor de toekomst worden vastgesteld, is het nodig om de fractie huishoudens per laagspanningsaansluiting te bepalen. Voor elk MS knooppunt in het netwerk is geanalyseerd of de desbetreffende gebruikers huishoudens zijn. Dit is deels gedaan op basis van beschikbare data over het aantal klein- en grootverbruikers en deels visueel op basis van Google Maps.¹⁴

¹² Laborelec (2009) HERMES DG3 Impact DG en ‘nieuwe belastingen’ op het LS- net in bestaande woonwijken. Vanwege de grote gelijkenissen zijn ook “groen-stedelijk” en “kleinstedelijk” als gelijksoortige netten meegenomen.

¹³ Er is voor gekozen om geen casus te selecteren voor een binnenstedelijk of stedelijk gebied. Binnenstedelijke gebieden komen relatief weinig voor (Laborelec (2009)). Stedelijke gebieden worden voor een groot deel gezien als een aaneenschakeling van netwerken die lijken op de Steenwijk casus.

¹⁴ Hierbij zijn de volgende overwegingen gemaakt: 1. Knooppunten binnen de bebouwde kom vertegenwoordigen voor 100% huishoudens, tenzij het knooppunt zich op een bedrijfsterrein bevindt of tenzij het om een aansluiting met groot verbruikers gaat. 2. Knooppunten in landelijk gebied vertegenwoordigen voor 0% huishoudens, tenzij de knooppunten zich binnen een lintbebouwing bevinden. Vrijstaande boerderijen zijn dus niet opgenomen als huishoudens. Bij twijfelgevallen is er een percentage tussen 0% en 100% gekozen. Voorbeelden zijn knooppunten naast scholen of op de grens met bedrijfsterreinen.

De schatting van het totaal aantal huishoudens is gebaseerd op de referentie piekvraag per huishouden in 2013, de piekvraag per knooppunt en de aangenomen fractie huishoudens per knooppunt:

$$\text{totaal aantal huishoudens} = \sum \text{fractie huishoudens} \times \text{piekvraag} / \text{referentie piekvraag per huishouden}$$

De belangrijkste neteigenschappen van de geselecteerde cases zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Neteigenschappen van de geselecteerde cases

	Steenwijk	Drechterland
Totale piekvraag (waarvan voor huishoudens) in MW	7,6 (4,1)	8,6 (3,0)
Totaal aantal huishoudens volgens formule	4701	3459
Totale kabellengte in km	37,1	87,9
Aantal MS knooppunten	51	125
Aantal HS/MS connecties	1	3

4.1 Steenwijk (bebouwde kom)

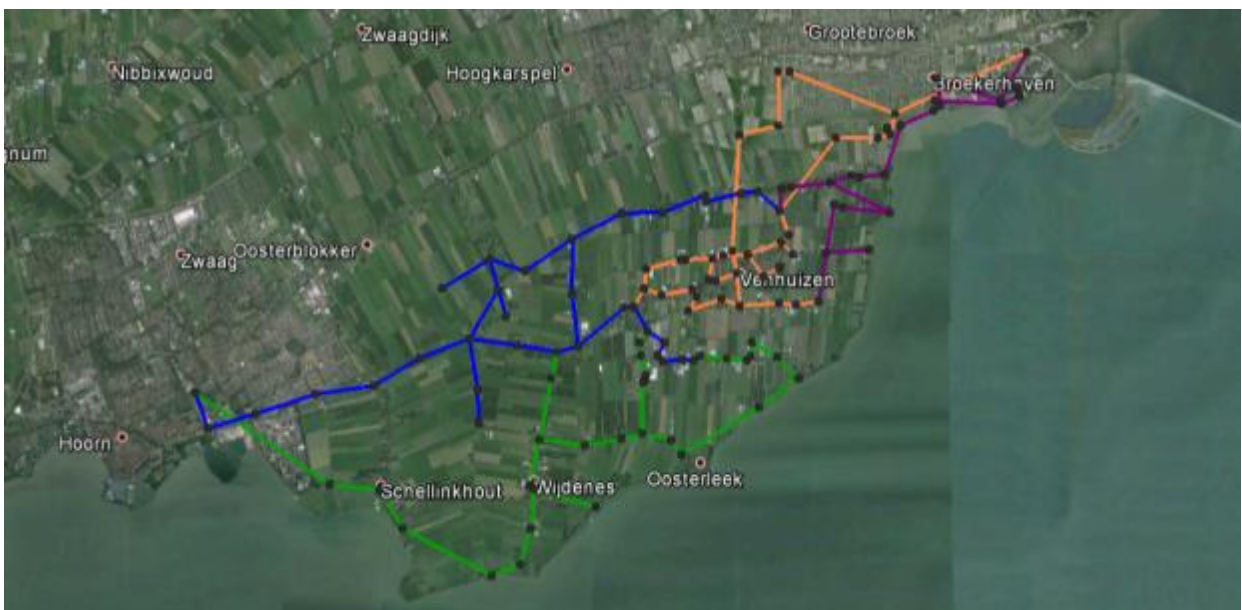
Casus Steenwijk vertegenwoordigt een stedelijk gebied met circa 4700 huishoudens. Het gebied dat het netwerk beslaat bestaat uit woonwijken en bedrijventerreinen. De woonwijken worden gevormd door rijtjeshuizen en twee-onder-een-kap woningen (Figuur 10 op pagina 12). In Bijlage II: Netwerk Steenwijk is de topologie van het netwerk weergegeven.

4.2 Drechterland (landelijk)

Casus Drechterland vertegenwoordigt een niet-stedelijk gebied met circa 3500 huishoudens. Het is een landelijk gebied met vrijstaande huizen (Figuur 11 op pagina 13). De woningen staan in dorpskernen, in een lintbebouwing of op grote afstand van elkaar. In Bijlage III: Netwerk Drechterland is de netwerktopologie weergegeven. Het gebied bevindt zich tussen Hoorn en Enkhuizen.



Figuur 10: Casus Steenwijk – boven: vogelvlucht (© Aerodata International Surveys, Google), midden: straatbeeld (© de Nationale Beeldbank, HdK), onder: netwerk topologie, verschillende kleuren vertegenwoordigen verschillende radialen in het netwerk (© Aerodata International Surveys, Google).



Figuur 11: Casus Drechtland - boven: vogelvlucht (© Aerodata International Surveys, Google), midden: straatbeeld (© Jan Dijkstra), onder: netwerk topologie, verschillende kleuren vertegenwoordigen verschillende radialen in het netwerk (© Aerodata International Surveys, Google).

5 Transitiescenario

Het gedefinieerde transitietranscenario naar 2050 bestaat uit aannames over de groei van de elektriciteits- en warmtevraag enerzijds en het aandeel van “nieuwe technologieën” als zonnepanelen, elektrische auto's en warmtepompen anderzijds. In Tabel 4 en Tabel 5 en zijn de scenarioparameters beschreven. De jaarlijkse groei van de elektriciteits- en warmtevraag zijn berekend op basis van het rapport “Naar een duurzamere warmtevoorziening van de gebouwde omgeving in 2050” (PBL 2012). In deze studie wordt de jaarlijkse daling in de warmtevraag gebaseerd op de aanname dat de energieprestaties van de bestaande woningvoorraad worden verbeterd tot gemiddeld energielabel B.

Tabel 4: Jaarlijkse groei van elektriciteits- en warmtevraag

Beschrijving	Waarde	Bron
Jaarlijkse groei elektriciteitsvraag	0,35%	15
Jaarlijkse groei warmtevraag	-0,5%	

Het vermogen aan zonnepanelen per huishouden is gebaseerd op basis van de studie “Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland” in opdracht van PBL. Het aandeel elektrische auto's is gebaseerd op de studie “Laadstrategie elektrisch wegvervoer” in opdracht van Netbeheer Nederland. Een schatting van het aandeel warmtepompen is overgenomen uit de studie “Scenario-ontwikkeling energievoorziening 2030” in opdracht van Netbeheer Nederland.

Tabel 5: Aandeel van nieuwe technologieën

Beschrijving	2014	2020	2030	2050	Bron
Vermogen zonnepanelen per huishouden (kWp)	0,05	0,3	1,6	2,5	16
Aandeel elektrische auto's (%)	0	5	35	65	17
Aandeel warmtepompen (%)	0	5	10	35	18
Vermogen windturbines ¹⁹ (MW)	0	0	0	0	20

¹⁵ PBL (2012) Naar een duurzamere warmtevoorziening van de gebouwde omgeving in 2050. In het referentiescenario wordt een stijging van de elektriciteitsvraag door apparatuur van 88 PJ (2008) naar 102 PJ (2050) gerapporteerd; dit is een jaarlijkse stijging van 0.35%. De gerapporteerde reductie warmtevraag bedraagt 334 PJ (2008) naar 275 PJ (2050); dit is een jaarlijkse daling van 0.46%.

¹⁶ PBL/DNV GL (2014) Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland. In deze studie worden verschillende scenario's beschreven. De studie gaat uit van een totaal potentieel van 66 GWp waarvan 41 GWp in de categorie “Wonen” en 25 GWp in de categorie “Utiliteit”. Er worden een aantal scenario's doorgerekend met betrekking tot het totaal geïnstalleerde vermogen, waaronder 0.7 GWp in 2014 (realisatie), 4 GWp in 2020 (NAZ), 20 GWp in 2030 (TKI Solar Energy) en 50 GWp in 2050 (indicatief opgesteld vermogen), op basis van de aanname dat 60% van het PV vermogen op huizen geplaatst wordt en er in Nederland 7,5 miljoen huishoudens zijn, is het geïnstalleerde vermogen respectievelijk 0,05 kWp in 2014, 0,3 kWp in 2020, 1,6 kWp in 2030 en 4 kWp in 2050. 4 kWp per huishouden resulteert in een vermogen van 30 GWp in de categorie “Wonen”. Daar dit vermogen erg hoog en slechts indicatief is, is in deze studie gerekend met een vermogen van 2,5 kWp per huishouden in 2050.

¹⁷ Movares/Netbeheer Nederland (2013) Laadstrategie elektrisch wegvervoer

¹⁸ Schatting op basis van CE Delft/DNV GL (2014) Scenario-ontwikkeling energievoorziening 2030, Ecofys (2013) Heat pump implementation scenarios en Ecofys (2009) Energiebesparing- en CO₂ reductiepotentieel hybride lucht/water warmtepomp in de bestaande woningbouw.

¹⁹ In deze studie wordt alleen gekeken naar grootschalige inzet van windturbines. De kleinschalige inzet van windturbines op gebouwen wordt niet meegenomen.

²⁰ De Omgevingsvisie voor Overijssel rapporteert geen kansrijke zoekgebieden voor windenergie rond Steenwijk, mede i.v.m. laagvliegroutes over het oostelijke deel van Steenwijk (<http://www.overijssel.nl/thema's/ruimtelijke-ontwikkeling/omgeving/omgevingsvisie/>). In het rapport “Herstructurering Wind op Land Noord-Holland – Plan-MER” van de Provincie Noord-Holland wordt binnen het gebied van het netwerk tussen Hoorn en Enkhuizen een strook van 3 km als voorkeursgebied genoemd. Er wordt aangenomen dat hier 18 MW aan windturbines geplaatst

6 Vraagprofielen

In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe de vraagprofielen van huishoudens voor de toekomst zijn ingeschat. Deze bestaan uit een basisvraagprofiel en uit de verwachte verandering van de vraag in verband met warmtepompen, elektrische auto's, zonnepanelen en windmolens. De vraagprofielen beschrijven de gemiddelde vraag per huishouden van een grote groep huishoudens. De gelijktijdigheid op het niveau van individuele huishoudens is daarom in de profielen geïntegreerd.²¹

6.1 Huidig basisvraagprofiel

Het huidige basisvraagprofiel voor het elektriciteitsgebruik van een doorsnee huishouden is vastgesteld op basis van de standaardprofielen voor elektriciteit van EDSN.²² Deze standaardprofielen geven per kwartier het elektriciteitsgebruik als fractie van het jaarverbruik. Deze fracties hebben een waarde tussen 0 en 1 die aangeeft welk deel van het jaarverbruik in het desbetreffende kwartier gebruikt wordt. Om het absolute verbruik per uur te bepalen zijn deze fracties allereerst gecombineerd tot fracties per uur en vervolgens vermenigvuldigd met het jaarverbruik (Tabel 6). Het aangenomen jaarverbruik voor elektriciteit en aardgas is hieronder weergegeven. Het jaarverbruik voor aardgas is van belang voor het bepalen van de warmtebehoefte van huishoudens. Hier wordt verder op in gegaan in Sectie 6.3.

Tabel 6: Aannames vraagprofielen

Beschrijving	Waarde
Jaarverbruik elektriciteit	3500 kWh
Jaarverbruik aardgas	1600 m ³

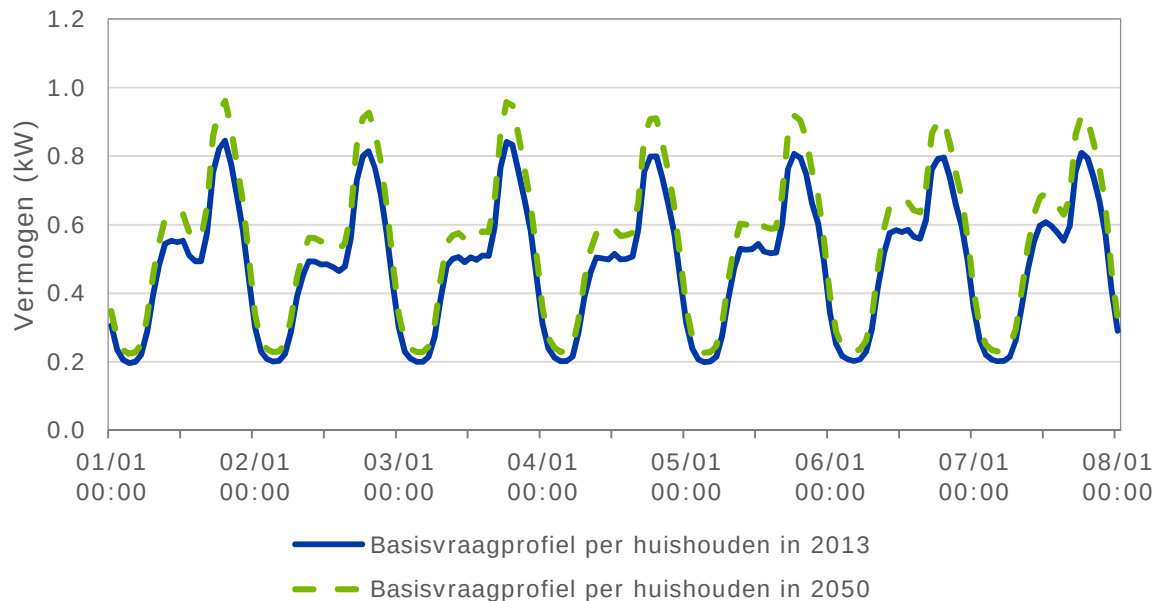
6.2 Toekomstig basisvraagprofiel

Om het toekomstige basisvraagprofiel te genereren wordt het huidige basisvraagprofiel geschaald op basis van de verwachte jaarlijkse elektriciteitsgroei (Tabel 4 op pagina 14, Figuur 12). In deze verwachting zijn economische groei, efficiëntieregelgeving en consumentenvoorkeuren meegenomen. Hierbij wordt aangenomen dat het profiel in vorm hetzelfde zal blijven. Het toekomstig basisvraagprofiel vormt de basis waaraan de technologie-specifieke transitieprofielen zullen worden toegevoegd.

kan worden. Echter turbines groter dan 2 MW worden direct op een onderstation aangesloten, dus deze zullen geen invloed hebben op de capaciteitsbehoefte van MS distributienet.

²¹ Bij het bestuderen van vraagprofielen van individuele huishoudens kunnen grote pieken zichtbaar zijn op de momenten dat er binnen het huishouden bepaalde apparaten worden gebruikt. Wanneer een grote groep huishoudens wordt bestudeerd, zullen niet alle huishoudens op dezelfde momenten dezelfde apparaten gebruiken. De gemiddelde vraag per huishouden wordt daarom lager. Een profiel van een individueel huishouden heeft daarom een lage gelijktijdigheid, i.e. gemiddeld zal een laag aantal huishoudens hetzelfde patroon vertonen. Een geaggregeerd profiel van een groep huishoudens beschrijft de gemiddelde vraag van die groep. Wanneer meerdere grote groepen gecombineerd worden, zullen de profielen eenzelfde patroon vertonen. Een profiel van een groep huishoudens heeft daarom een grote gelijktijdigheid. In Sectie 7 wordt de gelijktijdigheid verder beschreven en gebruikt voor de netwerkmodellering.

²² EDSN (2014) Profielen Elektriciteit 2013, gedownload van <http://www.edsn.nl/verbruiksprofielen/> op 17 september 2014



Figuur 12: Huidig en toekomstig basisvraagprofiel van een doorsnee huishouden. De weergegeven periode beslaat een week uit het jaarprofiel.

6.3 Warmtepomp profiel

In deze sectie zullen we nader ingaan op de verwachte elektriciteitsvraag van warmtepompen in de toekomst. Vanwege de vele facetten van het gedrag van warmtepompen begint dit hoofdstuk met wat achtergrondinformatie over warmtepompen.

6.3.1 Achtergrond: Vraagprofielen van warmtepompen

Dimensionering

Anno 2014 is de HR-ketel de belangrijkste technologie voor de verwarming van huishoudens en de productie van warm tapwater. Een gasgestookte ketel is in staat om met een zeer hoog vermogen warmte te leveren. Het is hierdoor mogelijk om het benodigde warme tapwater direct te produceren. Hierdoor is het niet nodig om over een voorraadvat met warm tapwater te beschikken. De gasgestookte ketels zijn dusdanig gedimensioneerd dat ze op zeer koude dagen voldoende capaciteit kunnen leveren, de ketel draait in die gevallen alleen bij een warm tapwatervraag op volledige capaciteit. De additionele kosten van de "overdimensionering" zijn bij gasgestookte ketels beperkt.

Bij warmtepompen zijn de investeringskosten echter sterk afhankelijk van de geïnstalleerde capaciteit. Bij warmtepompen is er daarom veelal sprake van "onderdimensionering", de geïnstalleerde capaciteit is ongeveer 80% van de benodigde capaciteit. Tijdens het beperkte aantal uren dat er toch meer capaciteit nodig is, wordt er gebruik gemaakt van een (geïntegreerde) back-up verwarming. De additionele kosten van de verminderde efficiëntie van de back-up wegen niet op tegen de besparingen op investeringskosten voor het warmtepompdeel van het verwarmingssysteem.

Comfort

De dimensionering van het verwarmingssysteem heeft ook een direct effect op het comfortniveau bij zeer koude dagen. In de woningbouw wordt er veelal rekening gehouden met een minimumtemperatuur waarbij een huis een bepaalde binnentemperatuur moet kunnen bereiken.²³ Bij een beperkt beschikbaar vermogen zal er sprake zijn van comfortverlies wanneer de temperatuur voor lange tijd onder deze minimale temperatuur zal liggen: de woning zal minder warm zijn, of bepaalde ruimtes van de woning zullen de gewenste temperatuur niet bereiken. Om dit comfortverlies te voorkomen, wordt er in deze studie vanuit gegaan dat er altijd voldoende back-up capaciteit wordt geïnstalleerd om het comfortniveau van het gebruik van een HR-ketel te behouden.

Hybride warmtepompen

Naast het gebruik van een warmtepomp met een elektrische back-up, kunnen warmtepompen ook geïnstalleerd worden in combinatie met een gasgestookte ketel. Bij deze hybride warmtepompen wordt de gasgestookte ketel gebruikt voor de productie van warm tapwater en als back-up bij een tekort aan vermogen. Veelal worden hybride systemen op dit moment gevormd door een bestaande gasgestookte ketel te combineren met een warmtepomp.

Vraagprofielen

De vraagprofielen van het verwarmingssysteem zijn sterk afhankelijk van de type warmtepomp en het al dan niet accepteren van comfortverlies (Tabel 7). Wanneer er sprake mag zijn van comfortverlies bij zeer koude dagen, zal de warmtepomp de gehele dag op vol en constant vermogen draaien. Er zijn in dat geval geen mogelijkheden om de piek te verschuiven. Wanneer er geen sprake mag zijn van comfortverlies is het effect op de elektriciteitsvraag afhankelijk van het geïnstalleerde systeem.

Volledig elektrisch systeem – Wanneer er een volledig elektrisch warmtepomp systeem is geïnstalleerd zal er bij voldoende back-up vermogen overdag een piek zichtbaar zijn in de elektriciteitsvraag. Overdag zullen de gebruikers de temperatuur in hun huis hoger willen hebben, waardoor er meer vermogen nodig is. Bij goed geïsoleerde woningen zal dit effect uiteraard kleiner zijn. Wanneer er sprake is van een onderdimensionering van het systeem, zal het systeem op vol en constant vermogen draaien en is er mogelijk sprake van comfortverlies. Het risico bestaat dat er, los van het geïnstalleerde systeem, conventionele elektrische verwarming wordt ingezet.

Hybride systeem – Bij de hybride warmtepomp zijn er verschillende mogelijkheden. Zo kan de warmtepomp dusdanig worden afgesteld dat deze op vol en constant vermogen draait, waarbij er voor de piekvraag gebruik wordt gemaakt van een gasgestookte ketel. Bij lage buitentemperaturen gaat de efficiëntie van de warmtepomp dusdanig omlaag dat het misschien wel effectiever is om in plaats van de warmtepomp de gasgestookte back-up meer te gebruiken. Als slimme oplossing zou de gasgestookte back-up ook gebruikt kunnen worden om de elektriciteitsvraag tijdelijk te verlagen.

²³ Voor de dimensionering van het gasnetwerk wordt rekening gehouden met een minimum temperatuur van -17 °C. Voor de woningbouw zijn er richtlijnen beschikbaar die de minimale binnentemperatuur bij een buitentemperatuur van -10 °C beschrijven. In het door ons gemodelleerde jaar is de effectieve daggemiddelde minimumtemperatuur -14.1 °C.

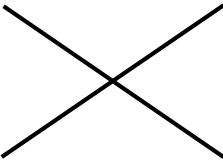
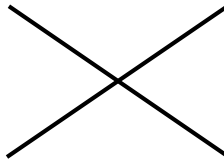
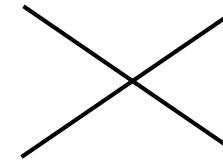
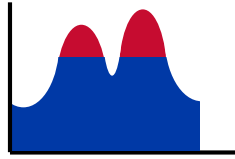
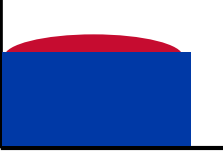
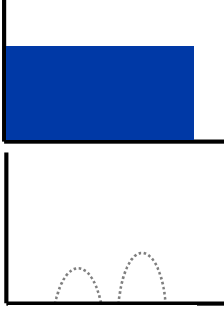
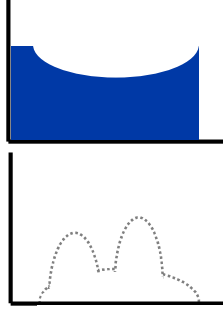
Scenario's

De mogelijkheid tot het inzetten van hybride systemen wordt beperkt door de aanwezigheid van een gasnetwerk. Wanneer een gasnetwerk aanwezig is, zullen hybride systemen in eerste instantie de belangrijkste geïnstalleerde technologie zijn. De warmtepompen worden dan veelal met het bestaande verwarmingssysteem gecombineerd. Een gasgestookte ketel wordt dan gebruikt om te voorzien in de piekvraag. Bij een ambitie voor een klimaatneutrale woningvoorraad in 2050 (PBL 2014) is de beschikbaarheid van een gasnet op de lange termijn onzeker.²⁴ Daarnaast zal het aanbod van aardgas tegen 2050 fors terug lopen. Het is daarom waarschijnlijker dat in de loop van de tijd de hybride warmtepompen zullen worden vervangen door volledig elektrische warmtepompen. Gezien het lange termijn perspectief is er voor gekozen om bij het modelleren van de vraagprofielen uit te gaan van een volledig elektrisch systeem.

In Tabel 7 zijn de verschillende overwegingen samengevat en de effecten op de vraagprofielen gevisualiseerd.

²⁴ In het rapport "Op weg naar een klimaatneutrale woningvoorraad" (PBL 2014) worden de mogelijkheden verkend voor een emissieloze gebouwde omgeving in 2050 als aansluiting op het "Energieakkoord voor duurzame ontwikkeling".

Tabel 7: Verschillende vraagprofielen voor verschillende warmtepomp configuraties. Blauw: elektriciteitsvraag voor warmtepomp, rood: elektriciteitsvraag voor back-up, grijs: gasvraag voor back-up.

	Volledig elektrische warmtepomp		Hybride warmtepomp	
	Conventioneel	Slim	Conventioneel	Slim
Comfort-verlies	Constante elektriciteitsvraag 	Niet mogelijk 	Niet van toepassing 	Niet van toepassing 
Geen comfort-verlies	Elektriciteitsvraag voor warmtepomp volgt de profiel van de warmtevraag 	Spreiding van pieken in back-up door het voorwarmen van het huis 	Constante elektriciteitsvraag voor warmtepomp, pieken opvangen met gasgestookte back-up 	Gereduceerde elektriciteitsvraag voor warmtepomp, pieken opvangen met gasgestookte back-up 

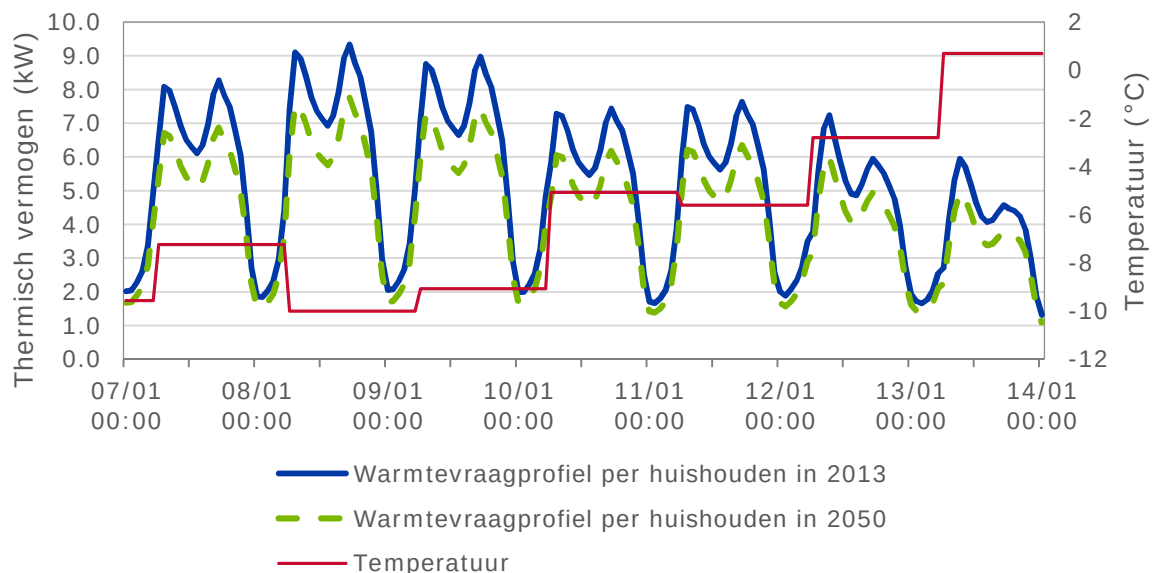
6.3.2 Aannames voor deze studie

In deze studie kijken we daarom naar volledig elektrische systemen, zonder comfortverlies op zeer koude dagen.²⁵ Om het vraagprofiel van een warmtepomp te bepalen wordt warmtevraag van een doorsnee huishouden berekend op basis van de standaardvraagprofielen voor aardgas van EDSN²⁶ (Figuur 13). Hierbij wordt aangenomen dat het verloop van de gasvraag een indicatie is van de warmtevraag van een huishouden.

²⁵ De daggemiddelde minimumtemperatuur in het door ons gemodelleerde jaar is -14.1 °C.

²⁶ EDSN (2014) Profielen Aardgas 2013, gedownload van <http://www.edsn.nl/verbruiksprofielen/> op 17 september 2014

De standaardprofielen van EDSN bevatten een temperatuuronafhankelijk deel en een temperatuurafhankelijk deel. Het totale profiel wordt berekend volgens de methodiek vastgesteld door de ACM²⁷, op basis van de meteorologische data van het jaar 1997.²⁸ Om het absolute verbruik per uur te bepalen zijn deze fracties vermenigvuldigd met het jaarverbruik (Tabel 6).



Figuur 13: Effecten van de temperatuur op de gemiddelde warmtevraag in huishoudens. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel

Verwachte economische groei, efficiëntieregelgeving en consumentenvoorkeuren zullen van invloed zijn op de toekomstige vraag naar warmte. Het warmtevraagprofiel is daarom geschaald op basis van de verwachte jaarlijkse groei van de warmtevraag (Tabel 4 op pagina 14). Zoals daarin te zien is, wordt aangenomen dat de warmtevraag zal dalen. Dit houdt onder andere verband met de verbetering van de isolatie. Betere isolatie zal als gevolg hebben dat de profielen vlakker van vorm worden. In deze studie wordt aangenomen dat het gehele profiel geschaald zal worden op basis van de reductie in warmtevraag (Figuur 13). Het profiel na isolatie bevat daarom nog steeds pieken aan het begin van de dag en aan het begin van de avond, op momenten dat er een hogere vraag naar verwarming is. De pieken en dalen zijn echter minder scherp naarmate de reductie groter wordt.

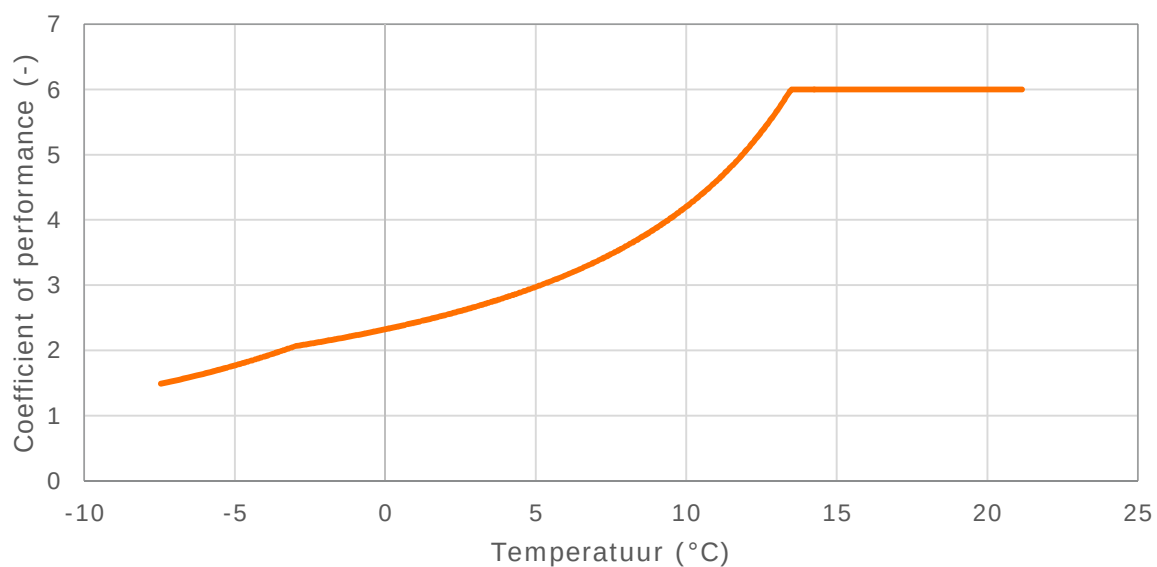
Tabel 8: Technische specificaties warmtepomp

Beschrijving	Waarde
Thermische capaciteit ($P_{th,max}$)	6 kW
Coëfficiënt of performance (CoP)	Min. 1; Max. 6
Back-up efficiëntie (η)	95%

²⁷ ACM (2014) Allocatievoorwaarden gas. Het verbruiksprofiel (VP) is berekend op basis van het temperatuuronafhankelijke deel van het profiel (TOP) en het temperatuurafhankelijke deel van het profiel (TAP), bepaald volgens: $VP = TOP + TAP$. Het temperatuur afhankelijke profiel wordt berekend op basis van een regressiecoëfficiënt (RER), de stooktemperatuur (TST) en de etmaalgemiddelde effectieve temperatuur (T_{eff}), waarbij $TAP = 0$ als $T_{eff} > TST$ en $TAP = RER \times (TST - T)$ als $T_{eff} \leq TST$. De etmaalgemiddelde effectieve temperatuur (T_{eff}) is berekend op basis van de etmaalgemiddelde temperatuur (T) en de etmaalgemiddelde windsnelheid (W), bepaald volgens: $T_{eff} = T - (W/1,5)$

²⁸ Er wordt gebruik gemaakt van meteorologische data van 1997 omdat dit jaar enkele dagen met zeer lage temperaturen bevat. Het elektriciteitsnetwerk moet toereikend zijn om op zeer koude dagen voldoende vermogen te kunnen leveren.

De elektriciteitsvraag van een warmtepomp wordt bepaald door de warmtevraag en de technische specificaties van de warmtepomp (Tabel 8).²⁹ De maximale warmtelevering door de warmtepomp zelf wordt beschreven met de thermische capaciteit. Wanneer de gevraagde thermische capaciteit hoger ligt, wordt de resterende warmtevraag geleverd door de elektrische back-up verwarming (Figuur 15). De gemodelleerde warmtepomp is een lucht-vloeistof warmtepomp. De efficiëntie (Coëfficiënt of performance, CoP) van de warmtepomp is sterk afhankelijk van de externe temperatuur (Figuur 14).³⁰ Omdat de piekvraag op momenten ligt met een zeer lage buitentemperatuur wordt er van een lage CoP uitgegaan op deze dagen. Vanwege de lage efficiëntie van de warmtepomp verschilt het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp en de back-up nauwelijks. Dit leidt tot relatief hoge vraagpieken in het profiel (Figuur 16).³¹



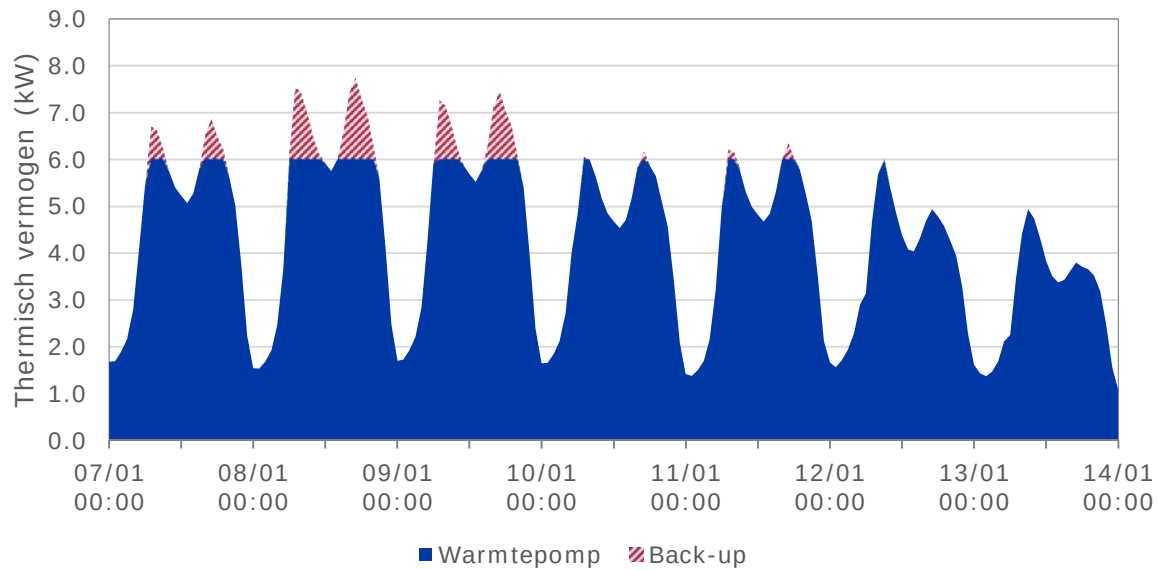
Figuur 14: Temperatuursafhankelijkheid van de coëfficiënt of performance.³²

²⁹ De elektriciteitsvraag (P_e) van een warmtepomp wordt bepaald door de warmtevraag (P_{th}), de capaciteit van de warmtepomp (P_{max}), de efficiëntie van de warmtepomp (CoP) en de efficiëntie van de back-up (η) met: $P_e = P_{th} / CoP$ als $P_{th} \leq P_{max}$ en $P_e = P_{max} / CoP + (P_{th} - P_{max})$ * η als $P_{th} > P_{max}$.

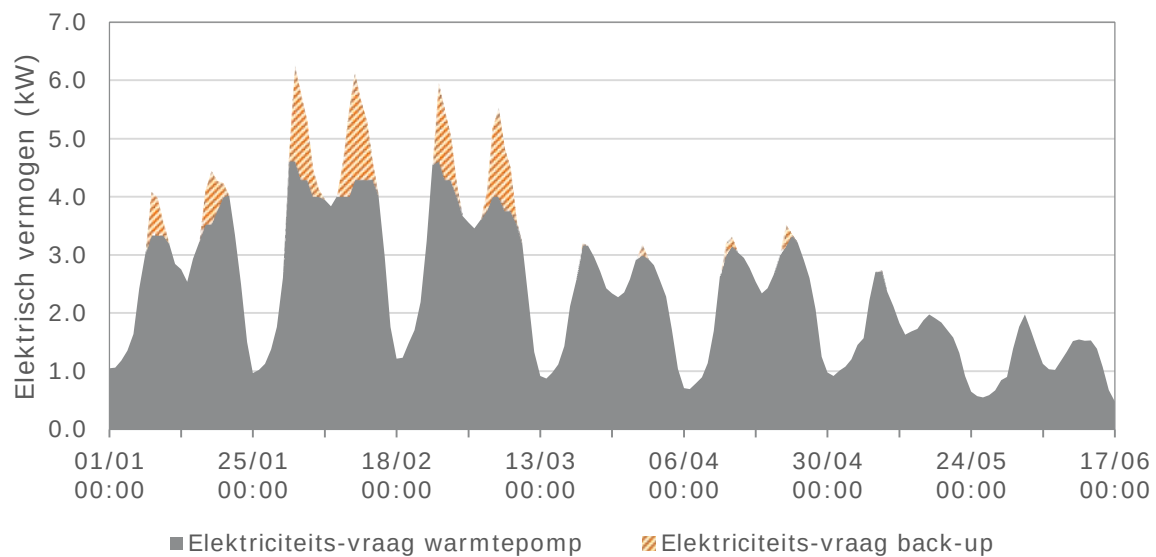
³⁰ Bij extreem lage temperaturen zal de efficiëntie 1 naderen. Voor temperaturen lager dan -8 °C is de CoP geëxtrapoleerd, voor temperaturen lager dan -11.5 °C is de CoP 1.

³¹ Bij toepassing van een vloeistof-vloeistof warmtepomp met bodembron zal de CoP op koude dagen hoger blijven. De pieken zullen dan vooral veroorzaakt worden door de benodigde back-up met een veel lagere efficiëntie.

³² Interne Ecofys studie.



Figuur 15: Warmteproductie door warmtepomp en back-up. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.³³



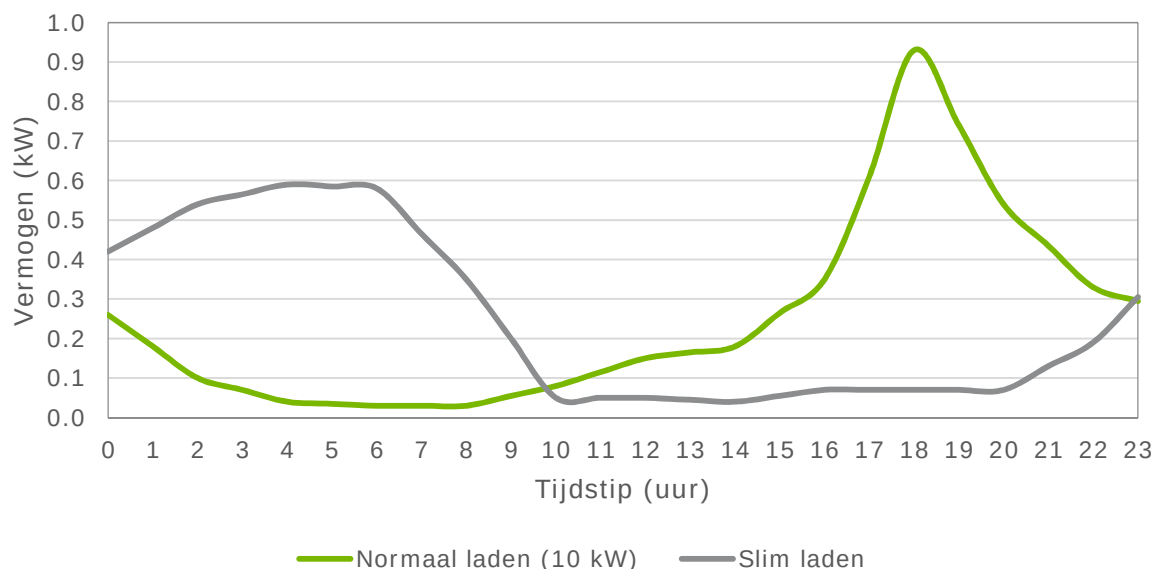
Figuur 16: Vraagprofiel van verwarmingssystemen met warmtepomp en elektrische back-up. Op koude dagen is de vraag als gevolg van de lage CoP van de warmtepomp en de inzet van de back-up zeer hoog. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.

³³ Weergegeven grafiek is voor een scenario met een zeer hoge warmtevraag

6.4 Elektrische auto profiel

De impact van het laden van elektrische auto's (EV profiel) op de elektriciteitsvraag is sterk afhankelijk van het moment waarop geladen wordt. In de studie "Laadstrategie elektrisch wegvervoer" (Movares 2013) wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende scenario's, zoals overal opladen, alleen thuis opladen en alleen snelladen. Deze scenario's hebben elk een karakteristieke impact op de grootte en het tijdstip van de piek in de elektriciteitsvraag. Omdat onze aandacht bij de elektriciteitsvraag van huishoudens ligt, kiezen we voor het scenario "alleen thuisladen". Voor dit scenario geeft de studie door Movares echter alleen het laadvermogen bij een 1x16A aansluiting. Onze verwachting is dat bij verregaande penetratie van elektrisch vervoer, er vooral gebruik gemaakt zal worden van aansluitingen met een hogere capaciteit. Het EV profiel is daarom overgenomen uit de studie "The power of electric vehicles"³⁴ waar onderscheid wordt gemaakt tussen laden met laag vermogen (3 kW), laden met hoog vermogen (10 kW) en slim laden. Deze geaggregeerde laadprofielen zijn berekend op basis van aannames over de wijze van laden en de efficiëntie van het elektrisch rijden en een analyse van gegevens over de gereden afstand en het tijdstip van aankomst. Er wordt dus aangenomen dat de gereden afstand in beide cases gelijk zijn. In werkelijkheid zal dit per casus verschillen.

Voor onze studie zijn de profielen van laden met een vermogen van 10 kW gebruikt voor het EV profiel. Zoals later zal worden beschreven, wordt ook het slimme EV profiel op dit promotieonderzoek gebaseerd. Het in Figuur 17 gevisualiseerde profiel beschrijft het gemiddelde profiel voor het laden van een elektrische auto. Het maximale vermogen is daardoor lager dan het maximale vermogen zou zijn in het profiel van een individuele elektrische auto.



Figuur 17: Laadprofielen van elektrische auto's. De weergegeven periode beslaat een dag van het jaarprofiel.

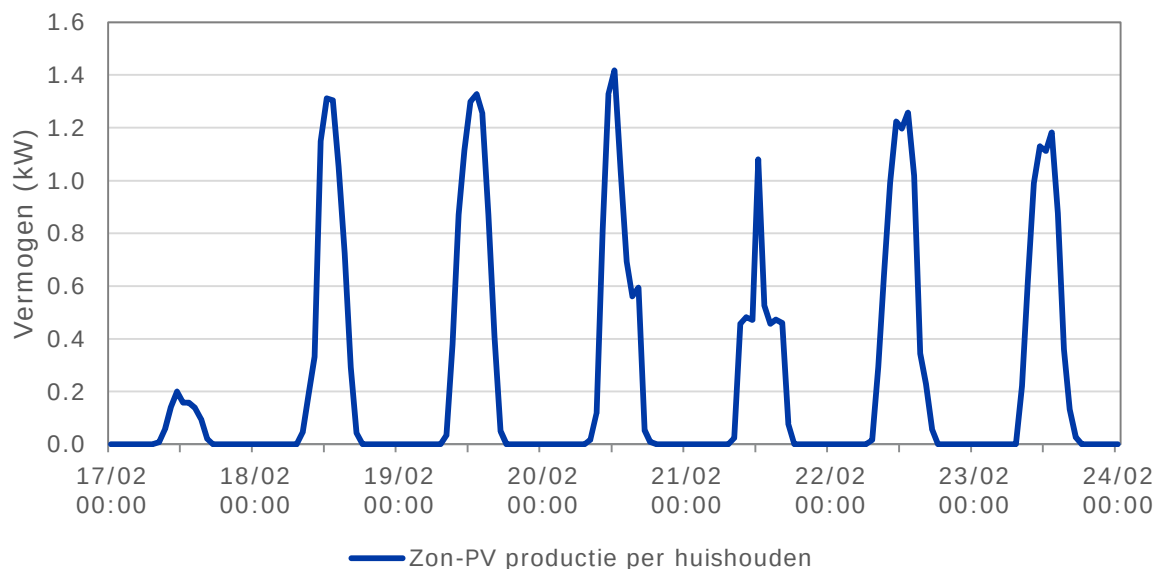
³⁴ Verzijlbergh (2013) The Power of Electric Vehicles – Exploring the value of flexible electricity demand in a multi-actor context

6.5 Zon-PV profiel

Het productieprofiel van zonnepanelen (zon-PV profiel) wordt bepaald door de geïnstalleerde capaciteit (zie Tabel 5 op pagina 14), de jaarlijkse productie per geïnstalleerd vermogen (Tabel 9) en de weersomstandigheden. De extremen in weersomstandigheden resulteren in geen productie (besneeuwde daken) of maximale productie (zonnige zomerdag). Om de jaarprofielen te genereren wordt gebruik gemaakt van een referentieprofiel.³⁵ Een week uit het jaarprofiel is weergegeven in Figuur 18.

Tabel 9: Technische specificaties zonnepanelen

Beschrijving	Waarde
Jaarlijkse productie per geïnstalleerd vermogen	900 kWh/kWp

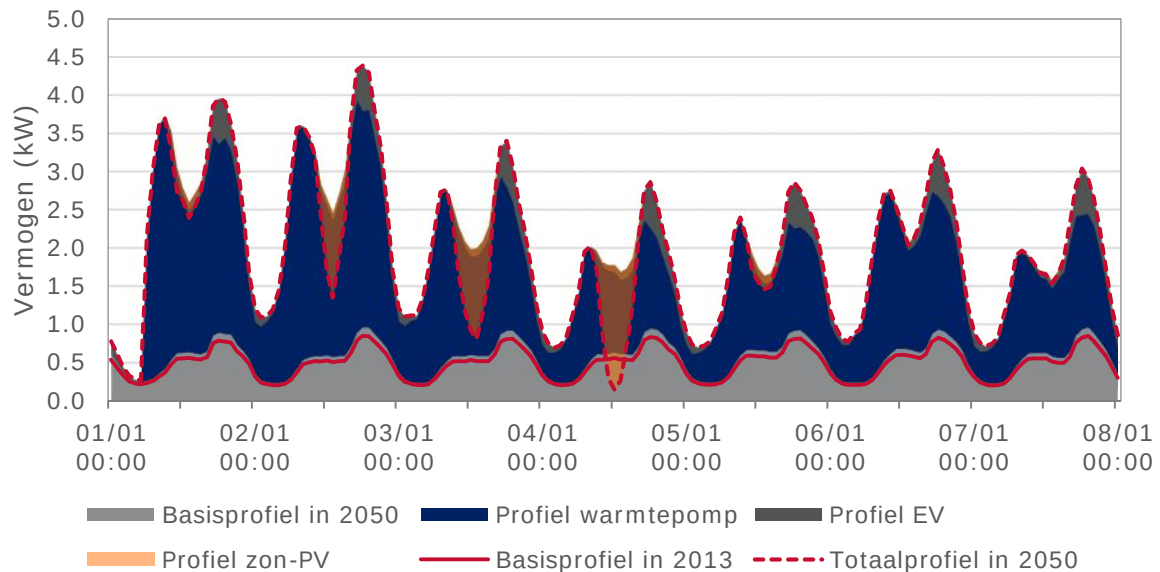


Figuur 18: Productieprofiel van zonnepanelen. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.

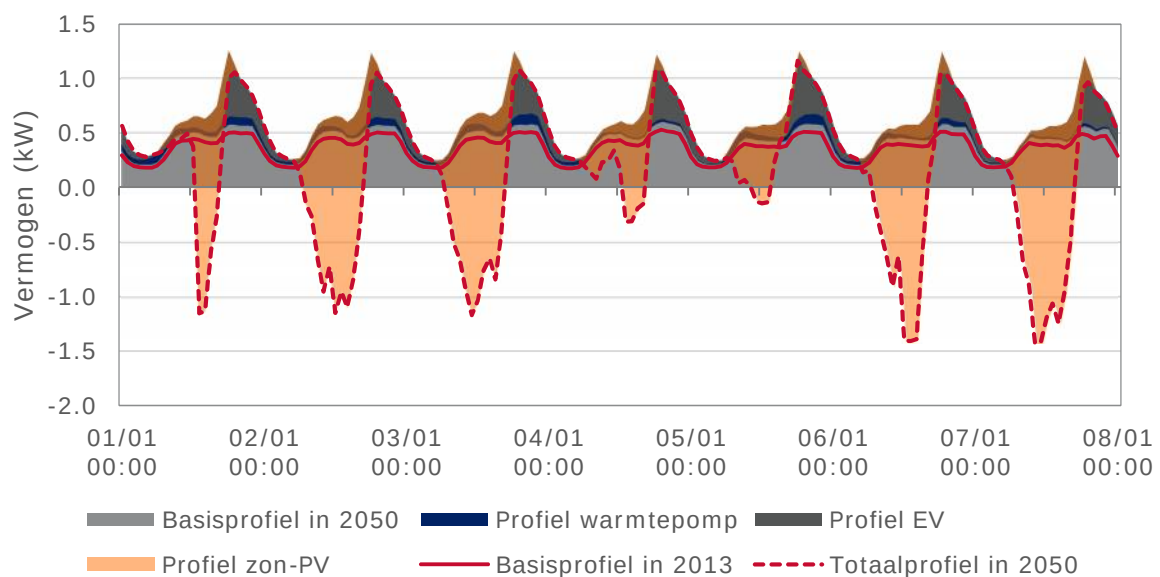
6.6 Toekomstig vraagprofiel

Het toekomstig vraagprofiel wordt gegenereerd door het toekomstig basisvraagprofiel te combineren met het warmtepomp profiel, het EV profiel en het zon-PV profiel. Dit resultaat wordt weergegeven in Figuur 19. De profielen voor de warmtepomp, de elektrische auto en de zonnepanelen worden geschaald op basis van de penetratiegraad (Tabel 5 op pagina 14).

³⁵ Het referentieprofiel is bepaald voor een systeem in De Bilt met een oriëntatie van 180° (pal zuid) en een hellingshoek van 35°. Het profiel is berekend op basis van een meteorologisch referentiejaar (test reference year).



Figuur 19: Toekomstig vraagprofiel – vraagpiek in het winterseizoen. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel



Figuur 20: Toekomstig vraagprofiel – terugleverpiek in het zomerseizoen. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.

Aan de resultaten zien we dat de maximale belasting van het netwerk met name veroorzaakt wordt door warmtepompen en dat deze piek plaatsvindt in de winter op een zeer koude dag. De piek als gevolg van het laden van elektrische auto's is op deze dagen beperkt ten opzichte van de piek door de warmtepompen. In de zomer zal er een grote hoeveelheid zonnestroom moeten worden teruggeleverd. Dit veroorzaakt echter een minder grote absolute piek dan de leveringspiek in de winter. Zelfs bij een zeer hoog gemiddeld geïnstalleerd vermogen van 5,5 kWp per huishouden³⁶ is de piek door warmtepompen hoger dan de absolute piek van de geproduceerde zonnestroom.

³⁶ Volgens PBL/DNV GL (2014) Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland, is het totaal potentieel 41 GWp in de categorie "Wonen". Op basis van 7,5 miljoen huishoudens bedraagt het gemiddeld geïnstalleerd vermogen 5,5 kWp.

6.7 Slim toekomstig vraagprofiel

Het slim toekomstig vraagprofiel wordt bepaald door het toekomstig vraagprofiel aan te passen op basis van het slimme warmtepomp profiel, het slimme EV profiel en het slimme zon-PV profiel. Deze slimme toekomstige vraagprofielen worden beschreven in Sectie 8. Bij het inzetten van de slimme oplossingen zal een inschatting worden gemaakt van de opportuniteit van het inzetten ervan. Als blijkt dat het inzetten van een additionele oplossing geen of negatieve kostenbesparingen oplevert, zal deze niet worden toegepast. Dit om zo dicht mogelijk bij de optimale inzet van slimme oplossingen te komen. Bij het toepassen van de slimme profielen vindt geen optimalisatie plaats tussen de verschillende technologieën. Het slimme profiel van de elektrische auto wordt niet beïnvloed door de vraag van de warmtepomp.

6.8 Overige vraagprofielen

Naast de elektriciteitsvraag in huishoudens zijn er allerlei andere aansluitingen in het netwerk. Hieronder kunnen winkels, utiliteitsbouw, MKB, kleine industrie en transport vallen. Deze worden gemodelleerd op basis van de maximale capaciteit van de aansluiting. Alle overige gebruikers worden met een constante elektriciteitsvraag gemodelleerd. Dit wordt gedaan omdat de slimme oplossingen in deze studie er op gericht zijn om de vraagpiek bij de veroorzaker zelf op te lossen. Modelmatig wordt aangenomen dat de toekomstige gevraagde maximale capaciteit gelijk is aan de huidige gevraagde maximale capaciteit.³⁷ In werkelijkheid wordt verwacht dat ook bij deze eindgebruikers de piekvraag omhoog zal gaan.

³⁷ Indien de terugleverpiek kritisch zou zijn zou de vraag op het minimale niveau vastgezet zijn.

7 Netwerkmmodellering

Uitgangspunt voor de berekening van de netwerkbelasting zijn de geconverteerde netwerkbestanden van de twee geselecteerde cases. De netwerkbestanden zijn afkomstig uit de administratie van de netbeheerders en worden voor de dagelijkse praktijk gebruikt. Daarom kan worden aangenomen dat het gevraagd vermogen in deze bestanden overeenkomt met de huidige piekvraag in het net. De gerapporteerde piekvragen van verschillende LS/MS-stations hoeven echter niet op hetzelfde moment hebben plaatsgevonden. Op basis van de eveneens beschikbare gelijktijdigheidsfactor kan de maximale netbelasting in de huidige situatie worden bepaald.

7.1 Piekvraag van huishoudens

De totale netwerkbelasting bestaat uit de netwerkbelasting als gevolg van de vraag van huishoudens en de netwerkbelasting als gevolg van de vraag van overige gebruikers. Om de netwerkbelasting bij een toegenomen piekvraag van huishoudens te bepalen, schalen we de netwerkbelasting als gevolg van huishoudens op basis van de toename in de piekvraag.

Voor elk MS knooppunt met een belasting hebben we het percentage huishoudens bepaald.³⁸ De belasting voor elk knooppunt wordt met behulp van dit percentage verdeeld in een belasting voor huishoudens en een overige belasting. Het gedeelte voor de huishoudens wordt vervolgens evenredig met de toegenomen piekvraag geschaald. Wanneer het huidige gemiddelde piekvermogen en het toekomstige gemiddelde piekvermogen van een huishouden respectievelijk 0,875 kW en 1,750 kW bedraagt, dan wordt het aandeel van de huishoudens in de belasting van het knooppunt vermenigvuldigd met een factor twee. Daarna wordt de nieuwe piekbelasting voor de huishoudens en de overige belasting weer opgeteld. Op deze manier wordt voor elk MS knooppunt de piekbelasting in de nieuwe situatie berekend. Daarna wordt met het load flow model de belasting van het gehele netwerk in de nieuwe situatie bepaald.

7.2 Gelijktijdigheid

De piekvragen van de MS knooppunten worden gecorrigeerd met gelijktijdigheidsfactoren. In de aangeleverde netwerkbestanden wordt voor elk MS/LS-station een piekwaarde gegeven. Deze pieken komen in de praktijk echter niet allemaal gelijktijdig voor. Om een realistische inschatting van het net onder piekbelasting te kunnen maken, moeten de piekwaardes per MS/LS-station nog met de gelijktijdigheidsfactor worden vermenigvuldigd. Een hoge gelijktijdigheidsfactor betekent dat er een grote kans is dat de verschillende pieken op hetzelfde moment plaatsvinden.

In deze studie wordt de netwerkbelasting bepaald bij een verandering in de gemiddelde piekvraag van de huishoudens. De verandering in de vraag van de huishoudens wordt bepaald door middel van vraagprofielen. In deze vraagprofielen is de gelijktijdigheid van de extra vraag van de huishoudens al verdisconteerd.

³⁸ Zoals uitgelegd op pagina 11

Daarom wordt in deze studie de correctie voor gelijktijdigheid alleen toegepast op de oorspronkelijke elektriciteitsvraag uit de netwerkbestanden en niet op de extra vraag volgens de vraagprofielen.

7.3 Storingsreserve

In een distributienet moet een bepaalde reserve aanwezig zijn om in storsingssituaties nog te voldoen aan de eisen. Daarom berekenen we de netbelasting bij toegenomen piekvraag ook in het geval van storing, zodat we kunnen inschatten of het net voldoende reserve heeft in de nieuwe situatie.³⁹ Om de benodigde reserve voor het hele net te bepalen, wordt op een aantal kritische punten een storing gesimuleerd en de belasting bepaald. De belasting van het netwerk bij storing in een sectie kan worden berekend door een streng te verbreken, een netopening in de ringstructuur te sluiten⁴⁰ en de belasting in de nieuwe situatie te bepalen. De resultaten voor de verschillende storingsen worden vergeleken en voor elke streng in het netwerk wordt de maximale belasting bepaald bij elke onderzochte storsingssituatie.

7.4 Netuitbreidingen

Uit de berekeningen volgt, gegeven een zekere piekbelasting per huishouden, voor elke kabel en elke transformator in het netwerk (inclusief distributietransformatoren) een gewenste maximale belasting inclusief storingsreserve. Van elke kabel en elke transformator is ook de toegestane maximale belasting bekend. Wordt de gewenste maximale belasting hoger dan de toegestane maximale belasting, dan is een zwaardere type kabel of transformator nodig.

Elke kabel of transformator die moet worden verzwakt wegens te hoge belasting draagt bij aan de kosten voor netwerkverzwakking. De kosten wegens te hoge belasting worden bepaald aan de hand van de kosten van een extra kabel of nieuwe transformator voor de benodigde uitbreiding van de capaciteit. De totale kosten van de netwerkverzwakking bij toegenomen piekvraag per huishouden worden berekend door de kosten van alle benodigde componenten op te tellen.

Bij de netwerkberekening wordt ook de spanning voor elk knooppunt in het netwerk bepaald. Deze spanning mag niet te laag worden. Is de spanningsval hoger dan een bepaald percentage, dan moet de kabel worden verzwakt. Voor het middenspanningsdeel van het net nemen wij echter aan dat het gerechtvaardigd is verzwakkingen wegens spanningsval buiten beschouwing te laten. Uit oriënterende berekeningen blijkt namelijk dat optredende problemen wegens spanningsval vrijwel altijd al zijn opgelost op het moment dat problemen wegens te hoge belasting zijn verholpen. De extra bekabeling om de hogere belasting mogelijk te maken, is namelijk voldoende om de spanningsval binnen acceptabele grenzen te brengen. Onder andere tijdens een overleg met een netwerkexpert⁴¹ blijkt dat netbeheerders dezelfde ervaring hebben. Deze aanname brengt een lichte onderschatting van de kosten met zich mee, namelijk in die gevallen dat er op enkele plaatsen in het netwerk toch nog een te grote spanningsval zou overblijven na aanpassing van de capaciteit, en dus additionele kosten gemaakt moeten worden om dit te verhelpen.

³⁹ Vanwege het thermische gedrag van een kabel in de grond mag in een tijdelijke omschakelsituatie een kabel hoger worden belast dan in normale bedrijfsvoering. Wij nemen hier aan dat in een storsingssituatie een kabel tot 120% van de normale belastbaarheid belast mag worden, hetgeen in lijn ligt met de ontwerpcriteria van MS-distributienetten bij netbeheerders.

⁴⁰ Een 'open' verbinding houdt in dat er geen verbinding is, en geen stroom. Een verbinding 'sluiten' betekent dat er wel stroom kan lopen.

⁴¹ Telefonisch gesprek met Rene Korver van Alliander d.d. 9 oktober 2014.

Tijdens de oriënterende berekeningen zijn de investeringskosten voor het oplossen van spanningsproblemen wel bepaald, maar bleek tevens dat het verschil in deze kosten tussen de situatie met of zonder slimme oplossingen nauwelijks veranderde. Daarom is het gerechtvaardigd deze kosten in deze studie buiten beschouwing te laten.

7.5 Netverliezen

Bij de netwerkmodellering worden ook de netverliezen bepaald voor een aantal scenario's. Voor elk scenario wordt eerst vastgesteld wat het nieuwe gemiddelde piekvermogen voor huishoudens is. Daarna worden in het netwerk waar nodig de kabels en distributietransformatoren verzwakt om de gevraagde piekbelasting aan te kunnen. Voor elk uur van het jaar wordt vervolgens vastgesteld wat de gemiddelde vraag per huishouden is volgens het vraagprofiel horend bij het scenario. Deze vraag dient dan als input voor een load flow berekening met het nieuw uitgelegde, verzwakte netwerk. Daarmee worden voor elk uur van het jaar de netverliezen berekend.⁴² Sommatie levert uiteindelijk de totale netverliezen per jaar voor het desbetreffende scenario.

⁴² In Bijlage IV: Berekening netverliezen wordt de relatie tussen vermogen per huishouden en netverliezen gevisualiseerd voor de verschillende piekvermogens waarvoor het netwerk is uitgelegd.

8 Slimme oplossingen

Op basis van het beschrevene in Sectie 4 tot en met 7 kunnen de conventionele netwerkkosten worden bepaald. In deze sectie wordt besproken op welke wijze slimme oplossingen deze kosten kunnen verlagen. De mogelijke slimme oplossingen zijn gekozen op basis van literatuur, bestaande pilots onder het programma Topsectoren Kennis & Innovatie (TKI Switch2SmartGrids⁴³) en andere projecten rond het slimme net.⁴⁴ In deze sectie worden de slimme oplossingen geselecteerd die in deze studie worden geëvalueerd.

8.1 Selectiecriteria

Uit de geïdentificeerde oplossingen worden drie oplossingen geselecteerd op basis van de volgende criteria:

- Jaarlijkse kosten per vermeden netverzwaring (hoe lager hoe beter).⁴⁵
- Toepasbaarheid in de gekozen casus en de aangenomen technologieën.
- Readiness: op welke termijn de oplossing toepasbaar is in de praktijk.

De volgende slimme oplossingen zijn getoetst aan de geïdentificeerde criteria:

- Slim laden van elektrische auto's – Elektrische auto's worden gestuurd opgeladen op momenten van weinig vraag. Hiermee wordt voorkomen dat elektrische auto's laden op het moment van de vraagpiek aan het begin van de avond.
- Slim laden en ontladen van elektrische auto's – Elektrische auto's worden gestuurd opgeladen op momenten van weinig vraag, maar kunnen bij een hoge vraag ook elektriciteit terugleveren aan het net. De resterende capaciteit kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de vraagpiek aan het begin van de avond op te vangen.
- Warmtepomp sturing – Wanneer huizen goed geïsoleerd zijn, kunnen ze fungeren als warmteopslag. Wanneer er een vraagpiek wordt verwacht kunnen de warmtepompen het huis in de tijd daarvoor vast voorverwarmen. De elektriciteitsvraag voor verwarming kan op momenten van een vraagpiek hierdoor beperkt worden.⁴⁶
- Batterijen – Bij weinig vraag kunnen batterijen worden opgeladen om vervolgens in het geval van een vraagpiek in extra capaciteit te voorzien.
- Witgoed – Het gebruik van witgoed kan gestuurd worden om te voorkomen dat deze apparaten bij een piekvraag actief zijn.
- PV productie beperken – Indien het terugleveren van zonnestroom problemen veroorzaakt in het netwerk kan de elektriciteitsproductie van zonnepanelen tijdelijk worden verlaagd om binnen de teruglevercapaciteit te blijven. Als de piekproductie slechts enkele keren per jaar plaatsvindt, is het verlies in opbrengst zeer beperkt. De kosten van het verlies aan productie moeten worden meegewogen bij het overwegen van deze oplossing.

⁴³ TKI Switch2SmartGrids (2014) Projecten, <http://tki-switch2smartgrids.nl/projecten/>

⁴⁴ O.a. Smart Grids: Rendement voor Iedereen (2014), <http://www.smartgridrendement.nl/>

⁴⁵ Het is belangrijk om in gedachten te houden dat de absolute piek hierbij zowel door levering als door teruglevering veroorzaakt kan worden – piekverlaging zal zich altijd richten op het moment van de absolute piek.

⁴⁶ Er wordt aangenomen dat het verlengen van de periode waarop binnenshuis de dagtemperatuur heerst (ongeveer 20 graden, afhankelijk van persoonlijke voorkeur) niet tot comfortverlies leidt. Het huis zal niet warmer worden dan de gewenste dagtemperatuur.

- Vliegwielen – Vergelijkbaar met batterijen kunnen ook vliegwielen als elektriciteitsopslag worden gebruikt. Vliegwielen zetten elektriciteit in kinetische energie om, dat vanwege een zeer lage weerstand van het vliegwiel weer voor een groot deel in elektriciteit omgezet kan worden als daar behoefte aan is.
- Power-to-gas – Dit houdt in dat elektriciteit in methaan wordt omgezet als het elektriciteitsnetwerk het niet kan verwerken. Deze technologie zou in de toekomst in de distributienetwerken kunnen worden toegepast. Het gas kan in het gasnetwerk worden gevoed, of opgeslagen worden om later weer in elektriciteit omgezet te worden. Deze oplossing is uiteraard alleen mogelijk als het gasnetwerk in stand wordt gehouden.

Een overzicht van de kosten en score op basis van criteria van de mogelijke slimme oplossingen wordt gegeven in Tabel 10. Het gaat hierbij om de meerkosten voor het toepassen van slimme oplossingen in vergelijking met de verwachte situatie. Dit betekent dat de kosten van de batterijen van elektrische auto's niet worden meegerekend; deze zijn immers ook aanwezig zonder de wens om slim te laden. Batterijen die speciaal voor dit doel worden aangeschaft worden echter wel in de kosten meegenomen.

Tabel 10: Mogelijke slimme oplossingen

Slimme oplossing	Kosten CAPEX (€/kW)		Kosten OPEX (€/kW per jaar)	Toepasbaarheid	Readiness	Bron
	Heden	Toekomst				
Slim laden E-auto's	400	20	-	+	+	47
Slim laden en ontladen	400	235	48	+/- ⁴⁹	+/-	50
Warmtepomp sturing	400	20	17 ⁵¹	+	+/-	52
Batterijen	730-800	315	48	+	+	53, 54
Witgoed	500	20	-	-	-	55
PV productie beperken	laag	laag	56	+	+	-
Vliegwielen	1650	-	-	-	-	57
Power-to-Gas	1100-2150	-	-	-	-	58

⁴⁷ EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid. "Therefore, the per-PEV infrastructure costs will run to between \$25 and 50 for long-term and short-term volumes respectively." We nemen aan dat laadpalen in de nabije toekomst standaard beschikken over een communicatieprotocol met slimme netten.

⁴⁸ Afhankelijk van verliezen bij laden en ontladen.

⁴⁹ Om het technisch mogelijk te maken vanuit een auto terug te leveren is een investering in een Power Control Unit (PCU) nodig. De additionele kosten voor deze PCU zijn erg hoog in vergelijking met de additionele flexibiliteit die gecreëerd wordt in vergelijking met het enkel slim laden zonder teruglevering. Om deze reden is deze oplossing als minder toepasbaar gekenmerkt.

⁵⁰ EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid. Table 7.7 - Cost of Vehicle to Grid Converter: Cost/Unit Low = \$300; Cost/Unit High = \$500

⁵¹ Afhankelijk van scenario. Zie Sectie 8.2.2 voor berekening.

⁵² Vergelijkbare prijzen als het slim laden van elektrische auto's. We nemen aan dat thermostaten in de nabije toekomst standaard beschikken over een communicatieprotocol voor slimme netten.

⁵³ Rocky Mountain Institute. (2014). The economics of grid defection when and where distributed solar generation plus storage competes with traditional utility service. Rocky Mountain Institute.

⁵⁴ Ecofys (2014) Energy Storage – Opportunities and Challenges

⁵⁵ EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid. "The additional cost to incorporate grid-ready functionality into future appliances is estimated at \$10 to \$20 per unit for the first generation, but declining to zero within 10 years as the grid-ready design becomes standard."

⁵⁶ Dit hangt af van de mate van inzet.

⁵⁷ Ecofys (2014) Energy Storage – Opportunities and Challenges

Om te voorkomen dat de kosten-batenanalyse van slimme netten op een cirkelredenering gebaseerd wordt, is in deze studie aangenomen dat er geen inkomsten zullen zijn uit de reeds geïdentificeerde bijkomende manieren om uit de verworven flexibiliteit door slimme oplossingen additionele waarde te creëren. Het in mindering brengen van deze inkomsten op de onderstaande kosten zal deze echter aanzienlijk naar beneden brengen, of zelf om doen slaan in inkomsten.

Op basis van de bovenstaande overwegingen is gekozen voor het nader bestuderen en, in volgorde van oplopende jaarlijkse kosten, toepassen van slim laden van elektrische auto's, sturen van warmtepompen en het gebruik van batterijen.

8.2 Beschrijving gekozen slimme oplossingen

Hieronder wordt in meer detail beschreven hoe de drie geselecteerde slimme oplossingen in de cases worden toegepast, welke veranderingen dit geeft in de piekvraag en welke investerings- en operationele kosten hiermee gemoeid zijn. In de kosten worden alle kosten inbegrepen die nodig zijn om de slimme oplossing mogelijk te maken, in vergelijking met de bestaande situatie. De investering voor de warmtepompen en elektrische auto's zelf wordt niet meegenomen, terwijl een hoger energieverbruik of snellere slijtage in vergelijking met de conventionele oplossing wel wordt meegenomen. We nemen aan dat de aan te sturen apparaten reeds de mogelijkheid hebben om op afstand aangestuurd en gemonitord te worden. Thermostaatssystemen hebben deze mogelijkheid al. Ook elektrische auto's worden reeds voorbereid op het aansturen van laadpatronen.

Als kosten voor slimme oplossingen zijn ook de kosten opgenomen voor het toevoegen van de software die het mogelijk maakt voor de netbeheerder om op bepaalde momenten de apparaten aan te sturen. Dit worden de basiskosten genoemd.⁵⁹ We gaan er dus vanuit dat er geen hardware voor energiemanagementsysteem hoeft te worden geïnstalleerd voor dit doel.⁶⁰

8.2.1 Slim laden

Op dit moment worden elektrische auto's bij aansluiting aan de lader direct opgeladen. Omdat dit het moment van thuiskomst is, valt dit moment veelal samen met de piek in de energievraag van huishoudens. Wanneer de elektrische auto die dag niet meer nodig is, kan het laden ook 's nachts plaatsvinden.⁶¹ Laadpunten met slimme technologie worden reeds aangeboden. Deze worden onder meer toegepast in de wijk Lombok in Utrecht.⁶²

⁵⁸ Ecofys (2014) Energy Storage – Opportunities and Challenges

⁵⁹ CE Delft (2012) Maatschappelijke kosten en baten van Intelligente Netten. De investeringskosten voor centrale systemen bedragen € 38.500.000 (hardware: € 13.500.000; software: € 25.000.000); de operationele kosten bedragen € 9.525.000 (hardware: € 2.025.000; software: € 7.500.000). Op basis van ca. 7,5 miljoen huishoudens zijn de investeringskosten en operationele kosten respectievelijk € 5,13 per huishouden en € 1,27 per jaar per huishouden.

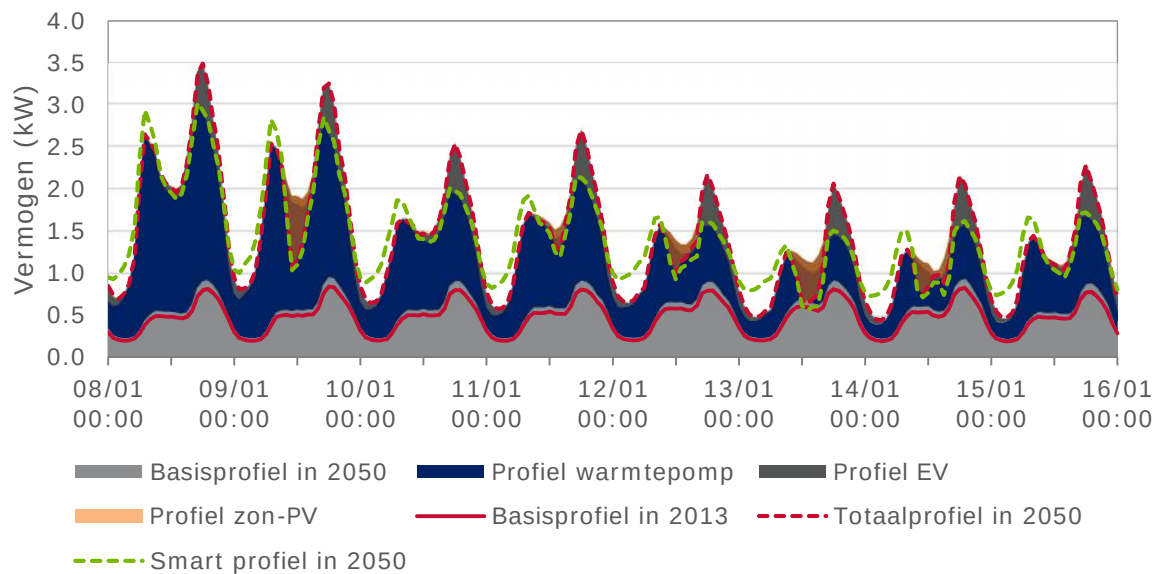
⁶⁰ Deze kosten worden overigens geschat op €120–235. Zie EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid. Table 7.3 – Cost of EMS (= Energy Management System) Portals: Cost/Unit Low = \$150; Cost/Unit High = \$300

⁶¹ Naast uitgesteld laden is het theoretisch ook mogelijk om de accu van een auto als opslag voor elektriciteit te gebruiken. Zo zou de resterende capaciteit aan het einde van de dag ingezet kunnen worden om de piekvraag te voldoen. Het gebruik van de batterij van elektrische auto voor teruglevering is in dit rapport buiten beschouwing gelaten. Een combinatie kan investeringskosten verlagen, maar zal ook de flexibiliteit beperken omdat de batterijen van auto's niet altijd beschikbaar zullen zijn voor elektriciteitsopslag. In Sectie 8.2.3 wordt elektriciteitsopslag apart besproken.

⁶² Economic Board Utrecht (2014) Slimme laadpalen voor Lombok, <http://www.economicboardutrecht.nl/nieuws/slimme-laadpalen-voor-lombok>

8.2.1.1 Technische mogelijkheden

De laadprofielen bij normaal laden en slim laden zijn reeds weergegeven in Figuur 17 op pagina 23. Het gemiddelde profiel van normaal laden heeft een piekvraag van 0,93 kW die plaats vindt om 18:00 uur. In het geval van slim laden is deze vraag slechts 0,07 kW. Het profiel van slim laden heeft een piekvraag van ongeveer 0,6 kW tussen 02:00 en 07:00 uur. Met slim laden is het dus mogelijk om de piekvraag per huishouden met een elektrische auto met 0,85 kW te verlagen. Dit betekent een verlaging van ongeveer 0,65 kW voor alle huishoudens gemiddeld, zoals te zien is in Figuur 21.



Figuur 21: Toekomstig vraagprofiel met het toepassen van slim laden. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.

8.2.1.2 Kosten

Om het slimme laden te realiseren is het van belang dat het laadproces gestuurd kan worden op basis van communicatie met netbeheerders. Het toepassen van deze functionaliteit vergt op dit moment nog een extra investering. We nemen echter aan dat laadpalen en/of elektrische auto's in de toekomst standaard beschikken over een communicatieprotocol voor informatie-uitwisseling met slimme netten.⁶³

Op basis van de studie "Estimating the cost and benefits of the smart grid" worden de additionele kosten voor het slim laden in de toekomst geschat op \$ 25. In dit rapport wordt gerekend met investeringskosten van € 20 per elektrische auto en een levensduur van 15 jaar. De totale kosten zijn dan 91 €/kW voor een periode van 40 jaar.

⁶³ De functionaliteit wordt al besproken in de draft versie van het nieuwe Open Charge Point Protocol (OCPP) voor laadpalen in Europa. In een Amerikaanse studie "Estimating the cost and benefits of the Smart Grid" (EPRI, 2011) wordt aangenomen dat deze functionaliteit in elke auto zal worden toegevoegd.

Vanwege een uurlijkse variatie op de day-ahead groothandelsmarkt zullen, bij een verschuiving van de vraag, de inkoopkosten voor de geleverde elektriciteit veranderen. Omdat de vraag van een moment van hoge vraag (de avondpiek) naar lagere vraag wordt verplaatst (de nacht) verwachten we dat deze inkoopkosten omlaag zullen gaan. Om deze reden hebben we voor deze post geen kosten meegenomen.

8.2.2 Warmtepomp sturing

De piekvraag van warmtepompen kan verlaagd worden door het huis als warmteopslag te gebruiken. Dit houdt in dat de warmtepomp eerder wordt aangezet om de gewenste temperatuur te bereiken. Dit zal tot hoger gebruik leiden, omdat een warm huis meer warmte verliest dan een kouder huis. Er wordt echter verwacht dat de isolatie van huizen sterk zal verbeteren, waardoor dit extra gebruik beperkt zal blijven. De kosten hiervoor worden als operationele kosten meegenomen.⁶⁴

8.2.2.1 Technische mogelijkheden

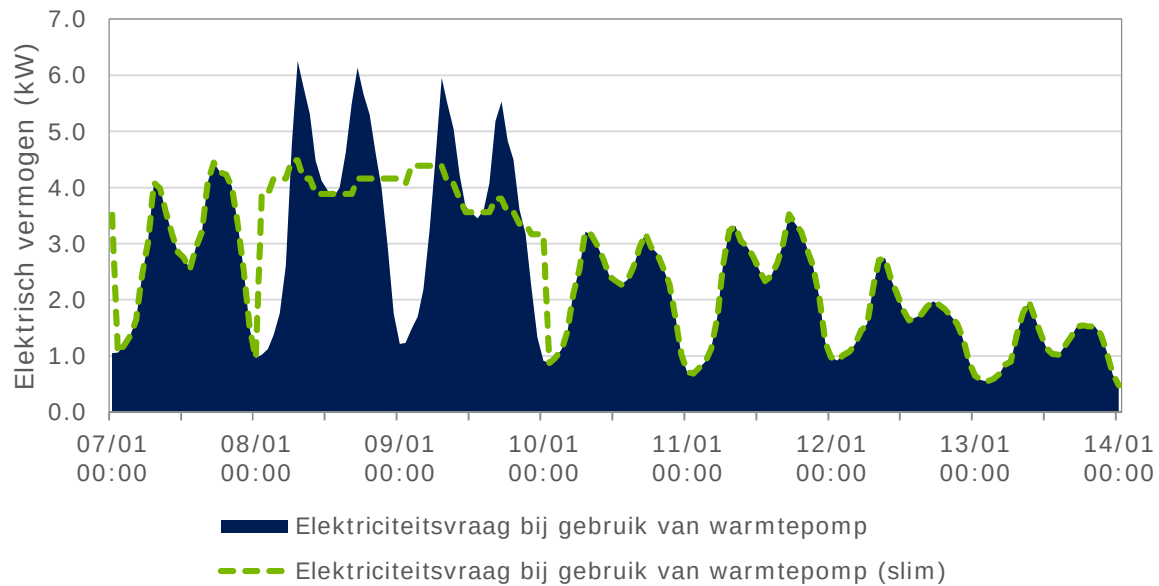
In Figuur 22 wordt het effect van de slimme aansturing van warmtepompen gevisualiseerd. De weergegeven dagen zijn twee koude dagen in een verder wat warmere week. Hierdoor is duidelijk zichtbaar wat het effect van slimme aansturing op het vraagprofiel is. Op de koudste dag van het jaar bedraagt de gemiddelde verlaging in elektrisch vermogen 2,5 kW.⁶⁵ Het additionele energiegebruik als gevolg van extra verliezen bedraagt 83 kWh bij een efficiëntie van 90%.⁶⁶ De mate van warmtepompsturing is sterk afhankelijk van de pieken in het profiel. Naarmate het profiel minder pieken bevat, zal het moeilijker worden om slim te verwarmen.⁶⁷

⁶⁴ Ecofys (2011), p. 32

⁶⁵ Het profiel weergegeven in Figuur 22 bevat niet de piek waarbij een reductie van 2,5 kW mogelijk is. Er is een ander deel van het profiel weergegeven om het verschil tussen wel en geen warmtepompsturing inzichtelijk te maken.

⁶⁶ Een efficiëntie van 90% betekent dat op momenten van slim verwarmen het de totale warmtevraag een factor 1.1 hoger is.

⁶⁷ Wanneer er een vloeistof-vloeistof warmtepomp met bodembron wordt geïnstalleerd, zal de CoP minder afhankelijk zijn van de buitentemperatuur. De pieken in het vraagprofiel worden dan voornamelijk veroorzaakt door de elektrische back-up. In die gevallen is het nog interessanter om gebruik te maken van slimme aansturing van warmtepompen omdat de warmtepompen efficiënter zijn vergeleken met de elektrische back-up.



Figuur 22: Toepassing van warmtepompsturing op twee koude dagen in een week. De weergegeven periode bestaat een week van het jaarprofiel.

8.2.2.2 Kosten

Om de warmtepomp sturing te realiseren is het van belang dat de thermostaat gestuurd kan worden op basis van communicatie met netbeheerders. Het toepassen van deze functionaliteit vergt op dit moment nog een extra investering. We nemen echter aan dat thermostaten in de nabije toekomst standaard beschikken over een communicatieprotocol voor informatie-uitwisseling.

Het gespreid en eerder verwarmen van een huis zal leiden tot extra warmteverliezen. Deze operationele kosten zijn sterk afhankelijk van de mate waarin spreiding plaatsvindt en de isolatiegraad van het desbetreffende huis.

We nemen aan dat de additionele kosten voor warmtepomp sturing vergelijkbaar zijn met de additionele kosten voor slim laden. In dit rapport wordt gerekend met investeringskosten van €20 per huishouden met warmtepomp sturing en een levensduur van 15 jaar. In deze studie passen we alleen warmtepomp sturing toe als dit de maximale piek gerelateerd aan de warmtepomp verlaagt. In het 2050 scenario met aansturing van warmtepompen wordt de warmtepompsturing circa 10 keer toegepast. De extra warmteverliezen resulteren in een additioneel elektriciteitsverbruik van circa 83 kWh.⁶⁸ Dit resulteert in operationele kosten van circa € 17 per jaar. De totale kosten zijn dan 303 €/kW voor een periode van 40 jaar.

Vanwege een uurlijkse variatie op de day-ahead groothandelsmarkt zullen, bij een verschuiving van de vraag, de inkoopkosten voor de geleverde elektriciteit veranderen. Omdat de vraag van een moment van hoge vraag (de ochtendpiek) naar lagere vraag wordt verplaatst (de nacht) verwachten we dat deze inkoopkosten omlaag zullen gaan. Om deze reden hebben we voor deze post geen kosten meegenomen.

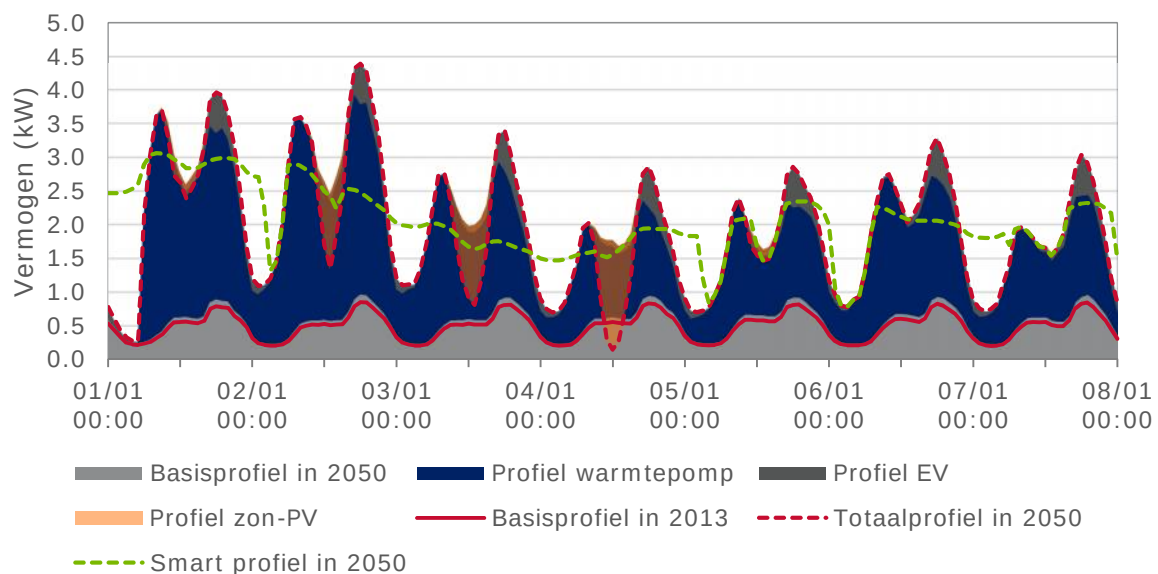
⁶⁸ Het extra elektriciteitsverbruik van 87 kWh is berekend op basis van meteorologische data van 1997, een jaar met een aantal zeer koude dagen. Wanneer er minder zeer koude dagen voorkomen kan het extra elektriciteitsverbruik lager liggen.

8.2.3 Elektriciteitsopslag

Batterijen kunnen gebruikt worden om elektriciteit op momenten van weinig vraag op te slaan, om dit vervolgens te gebruiken op momenten van hoge vraag. In Figuur 23 wordt gevisualiseerd wat het effect van het gebruik van batterijen is. De mate van piekreductie die gemaakt kan worden is afhankelijk van het vermogen en de capaciteit van de batterij. Het vermogen van de batterij beperkt de maximale reductie in piek gevallen, de capaciteit van de batterij beperkt de tijdsduur waarop de piek verlaagd kan worden. Om zowel netverzwaring in het MS-netwerk te voorkomen als maximale voordelen voor de huishoudens te kunnen realiseren, nemen we aan dat de batterijen bij huishoudens achter de meter kunnen worden geplaatst.

8.2.3.1 Technische mogelijkheden

De technische mogelijkheden zijn sterk afhankelijk van het vermogen en de capaciteit van de batterij. In het voorbeeld van Figuur 23 wordt gebruik gemaakt van een batterij met een vermogen van 3 kW en een capaciteit van 15 kWh. De batterij wordt op momenten van lage vraag opgeladen en levert op momenten van hoge vraag deze elektriciteit terug. De effecten van elektriciteitsopslag zijn vergelijkbaar met de effecten van warmtepompsturing. Een belangrijke waarde van batterijen is dat deze uitermate geschikt zijn om overproductie van zonnepanelen achter de meter op te slaan om het betalen van energiebelasting te vermijden mocht de salderingsregeling afgeschaft worden. Deze waarde van batterijen zijn in deze studie echter buiten beschouwing gelaten.



Figuur 23: Toepassing van batterijen om vraagpieken te reduceren. De weergegeven periode beslaat een week van het jaarprofiel.

8.2.3.2 Kosten

In deze studie wordt gerekend met een investering van 400 €/kW voor batterijen⁶⁹, en een levensduur van 10 jaar. Er worden geen operationele kosten aan elektriciteitsopslag toegekend. De totale kosten zijn dan 2072 €/kW voor een periode van 40 jaar. In het investeringsbedrag is communicatie aan de woningzijde meegenomen.

8.2.4 Overzicht

Tabel 11: Overzicht van de investeringskosten, levensduur, operationele kosten en de gerelateerde totale kosten van de gekozen slimme oplossingen.

	Investeringskosten (€)	Levensduur (jaar)	Operationele kosten (€/jaar)	Resultierend €/kW over periode van 40 jaar
Basiskosten	5,13	40	1,27	-
Slim laden	20	15	0	91
Warmtepompen sturen	20	15	17	303
Batterijen	400	10	0	2072

8.3 Effecten van slimme oplossingen buiten de scope van het onderzoek

Investerings in slimme oplossingen kunnen, naast de kostenbesparingen voor het distributienetwerk, ook voordelen opleveren voor de rest van het systeem. De belangrijkste voordelen, die in deze studie niet worden gekwantificeerd, worden hieronder beschreven.

8.3.1 Opwekcapaciteit

De mogelijkheid om de piekvraag te verlagen kan op nationaal en internationaal niveau het voordeel bieden dat het beschikbare opwekvermogen kan worden verlaagd. Dit is namelijk ingericht op de maximale landelijke piekvraag. Als we uitgaan van een piekvermogen dat geleverd wordt door Open Cycle Gas Turbines, kunnen we uitgaan van een besparing van ongeveer € 900 per kW aan piekverlaging. Daarbij komt nog € 32 per kW per jaar aan bespaarde operationele kosten.⁷⁰ Ter vergelijking, de slimme investeringen in dit rapport worden terugbetaald met een besparing van ongeveer 191–636 €/kW. Deze additionele besparingen zonder grote verhoging van kosten zullen de waarde van slimme netten dus aanmerkelijk verhogen.

Een andere indicatie van de waarde van flexibiliteit zijn de kosten voor noodvermogen. Noodvermogen wordt door TenneT gecontracteerd om in het geval van uitval van centrales snel het aanbod te kunnen verhogen of de vraag te verminderen. Grote bedrijven, zoals aluminiumfabrieken, nemen reeds aan deze markt deel door afschakelbaar vermogen aan te bieden. De vaste vergoeding voor het beschikbaar houden van afschakelbaar vermogen is met de huidige veilingprijzen ongeveer €25 per kW per jaar.⁷¹

⁶⁹ Deze kosten zijn genomen als een gemiddelde over de komende 40 jaar. Er wordt verwacht dat deze kosten in de loop der tijd zullen afnemen.

⁷⁰ Ecofys/IEEP (2013) A cost estimation of existing gaps and barriers, p. 1-37, [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/504466/IPOL-JOIN_ET\(2013\)504466\(ANN01\)_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/504466/IPOL-JOIN_ET(2013)504466(ANN01)_EN.pdf)

⁷¹ <http://www.tennet.eu>

Andere voordelen bij het opwekken van elektriciteit zijn een hogere efficiency door minder spinning reserve.

8.3.2 Hoogspanningsnetwerk

In het hoogspanningsnetwerk worden relatief kleine voordelen door smart grids verwacht. Door een in verhouding groot aandeel van industriële vraag die direct op het hoogspanningsnetwerk is aangesloten, en de kleine gelijktijdigheid van pieken doordat deze over grote gebieden wordt verdeeld, is de impact van slimme oplossingen kleiner dan in distributienetten. Tegelijkertijd echter wordt er door de invloed van het klimaat – via warmtepompen – een grotere gelijktijdigheid gecreëerd binnen het gehele land. Het netwerk zal hierdoor zwaarder belast worden. Het spreiden van de vraag kan hiertegen uitkomst bieden.

8.3.3 Achter de meter

Opslag achter de meter maakt het mogelijk om op of in het huis opgewekte stroom niet terug te leveren maar op te slaan en later te gebruiken. Dit zorgt ervoor dat de energiebelasting, die alleen toegepast wordt op van het net geleverde elektriciteit, niet verschuldigd zal zijn. Dit voordeel wordt nu nog teniet gedaan door de salderingsregeling. Deze wordt echter in de verdere toekomst waarschijnlijk afgeschaft. Achter de meter kan een batterij ook als noodstroom voorziening fungeren.

8.3.4 Realisatietijd van netverzwaringen

Het is mogelijk dat het realiseren van netverzwaringen langer duren dan het invoeren van een slimme oplossing. Dit kan zijn vanwege de doorlooptijd van een vergunningaanvraag of de tijdsduur van het uitvoeren van de netverzwaring. Dit voordeel van slimme oplossingen wordt niet meegenomen in de inschattingen van deze studie.

9 Kosten

De kosten van het middenspanningsnet worden bepaald door de investeringskosten en operationele kosten van het netwerk. De kosten van slimme oplossingen zullen met name plaatsvinden bij huishoudens. In Tabel 12 worden de verschillende kostenposten beschreven. In deze sectie wordt onderscheid gemaakt tussen de kosten voor netwerkaanpassingen in Sectie 9.1 en de kosten voor slimme technologieën in Sectie 9.2.

Tabel 12: Opbouw van de kosten in de berekeningen

Kostenpost	Beschrijving
Investeringskosten	De investeringskosten bestaan uit de afschrijvingskosten en de kapitaalkosten. De afschrijvingskosten is de vervangingswaarde van het netwerk, of andere activa, gedeeld door het aantal jaren waarin het technisch zal worden afgeschreven. De kapitaalkosten bestaan uit de jaarlijkse kosten die de netbeheerder maakt voor het aantrekken van kapitaal, dan wel via leningen, dan wel via aandeelhouders, dan wel via andere middelen.
Operationele kosten	Dit zijn de operationele kosten die de netbeheerder maakt. Deze kosten bestaan onder meer uit onderhoud, netverliezen en kantoorkosten.
Kosten voor huishoudens	Voor slimme oplossingen zullen huishoudens investeringen moeten doen. De afschrijving en operationele kosten hiervan zullen worden meegenomen in de totale kosten.

De uiteindelijke kosten worden weergegeven als kosten per jaar. Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de kosten bij een conventionele aanpak van de netbeheerder (netverzwaring) en de zogenaamde slimme aanpak. Voor het berekenen van de jaarlijkse kosten van een investering zal gebruik worden gemaakt van een annuïteitsfactor.⁷² De gerelateerde aannames voor de netwerkinvesteringen zijn weergegeven in Tabel 13. Voor de slimme technologieën wordt eenzelfde rentepercentage gebruikt, maar zal de looptijd verschillen.

Tabel 13: Aannames met betrekking tot de berekening van de annuïteitsfactor

Aanname	Waarde
Kapitaalkosten	5%
Looptijd (t)	40 jaar
Annuïteitsfactor	0,0543 ⁷³

In deze studie is inflatie buiten beschouwing gelaten. Alle kosten worden gerapporteerd als nominale kosten. Er wordt op dit moment van uitgegaan dat er geen tussentijdse grootschalige onderhoudswerkzaamheden plaats zullen vinden waarbij het gehele net wordt vervangen.

⁷² Een annuïteit is een vast bedrag dat jaarlijks betaald moet worden om de gedane investering met in achtneming van de kapitaalkosten terug te betalen. De annuïteitsfactor is het deel van de initiële investering dat per jaar betaald moet worden en kan worden berekend met $WACC / (1 - (1 + WACC)^{-t})$ waarbij de WACC de kapitaalkosten representeert.

⁷³ Deze aanname is hoger dan de huidige stand, die ongeveer tussen 3% en 4% ligt. Omdat de huidige rentestand echter uitzonderlijk laag is, is voor de komende 40 jaar een hoger percentage gekozen.

9.1 Kosten voor netwerkaanpassingen

De kosten van de netwerkaanpassingen worden bepaald door de benodigde investeringen in het elektriciteitsnet. In Tabel 14 zijn de kosten gerapporteerd die worden meegenomen in de berekening. In Figuur 24 wordt visueel geïllustreerd welke netonderdelen bedoeld worden. Bij het berekenen van de investeringskosten van netverzwaring wordt aangenomen dat er een tweede kabel gelegd wordt.

Tabel 14: Kostenposten⁷⁴ voor netverzwaringen

Kostenpost	Specificatie	Kosten (€)	
MS-kabel (per meter)	3 x 240 AL	80	
	3 x 1 x 630 AL	140	
Trafo MS/LS (per stuk)	250 kVA	8.500	
	400 kVA	10.500	
	630 kVA	14.000	
	> 630 kVA	35.000 ⁷⁵	
	Aansluiting	< 630 kVA	8.350 ⁷⁶
		> 630 kVA	3.500 ⁷⁷
Trafo HS/MS (per kW)	Generiek	55	



Figuur 24: Netwerkinfrastructuur, links en midden: MS/LS transformatorhuisjes (© Frans van Nes, CC BY-SA 3.0, © Ward van Wanrooij, CC BY-SA 3.0), rechts: HS/MS station (© Touhib, CC BY-SA 3.0).

⁷⁴ Dit zijn gemiddelde kosten. De prijzen kunnen afhankelijk van de lokale omstandigheden verschillen.

⁷⁵ Bij het uitbreiden naar een trafo groter dan 630 kVA is in ieder geval een nieuw transformatorhuisje noodzakelijk. De kosten daarvan zijn € 35.000 onafhankelijk van de gewenste capaciteit in kVA.

⁷⁶ De kosten per aansluiting bestaan uit € 4.500 voor het aansluiten van de trafo plus € 3.850 gemiddelde kosten voor het bouwen en aansluiten van een nieuw transformatorhuisje. Een nieuw transformatorhuisje is nodig in ongeveer 10% van de gevallen (gesprek met experts van Liander d.d. 14-10-2014) en kost circa € 35.000 plus € 3.500 aansluitkosten.

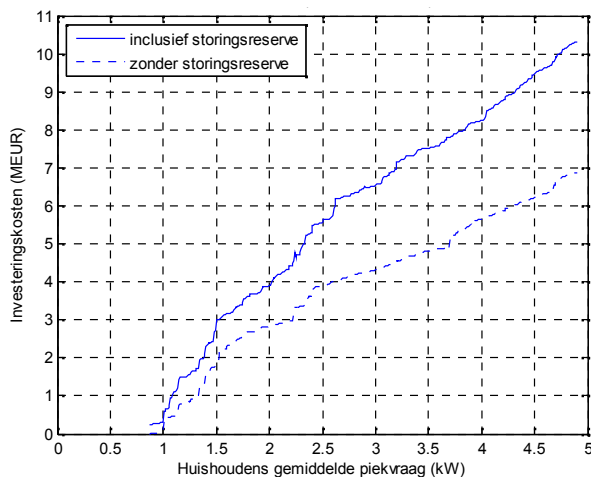
⁷⁷ Aansluitkosten van het nieuwe transformatorhuisje bij een capaciteit boven de 630 kVA. De kosten voor de aansluiting zijn lager vergeleken met de kosten bij een capaciteit onder 630 kVA omdat voor de lagere capaciteit kosten verwerkt zijn voor een nieuw transformatiehuisje (zie voetnoot 76), bij capaciteiten boven 630 kVA zijn deze kosten opgenomen in de transformator kosten (zie voetnoot 75).

Voor elk van de cases is doorerekend welke netuitbreidingen nodig zijn bij een toename van de piekvraag van huishoudens. Hierbij is gekeken naar de situatie met en zonder de mogelijkheid van omschakeling bij storing. Deze analyse is uitgevoerd voor een piekvraag per huishouden tot 5 kW. Vervolgens zijn op basis van de netuitbreidingen de investeringskosten berekend. Voor beide cases zijn de investeringskosten en piekvraag van huishoudens uitgezet in grafieken (Figuur 26 t/m Figuur 27). Voor de operationele kosten van het netwerk nemen we aan dat deze jaarlijks 1,5% van de investeringskosten bedragen.

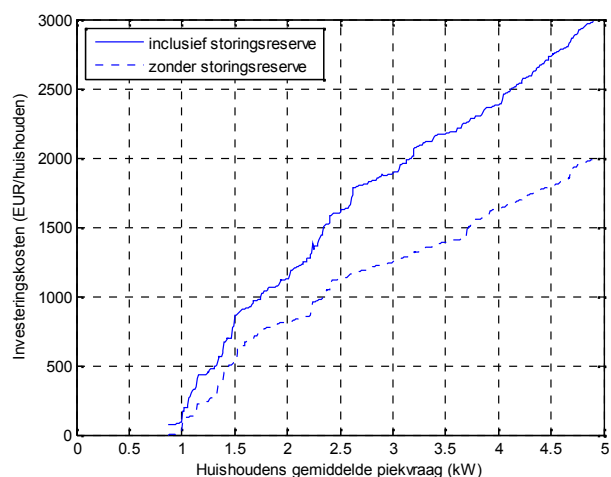
9.1.1 Drechterland

In de onderstaande figuren zijn de kostencurves van de casus Drechterland weergegeven. Figuur 26 geeft de kosten als functie van de piekvraag per huishouden met en zonder rekening te houden met storingsreserve.⁷⁸ Zonder storingsreserve zijn er vanaf een piekvraag van circa 1 kW additionele investeringen in het net nodig. De kosten lopen op tot bijna 7 miljoen euro bij een piekvraag van 5 kW. De figuur geeft ook de kosten met inachtneming van storingsreserve. Deze situatie geeft weer welke investeringen er nodig zijn om het net dusdanig bestendig te maken dat het net ook bij een storing toereikend is.⁷⁹ Om de piekvraag bij storingen op te vangen zijn al direct additionele investeringen in het net nodig.⁸⁰ De kosten lopen op tot meer dan 10 miljoen euro bij een piekvraag van 5 kW.

geeft dezelfde kosten weer, maar nu uitgezet als kosten per huishouden. De investeringen voor netverzwaringen in het middenspanningsnet zijn circa € 740 per additionele kWp per huishouden.



Figuur 26: Kosten voor het gehele middenspanningsnetwerk in Drechterland als functie van de geaggregeerde piekvraag (vermogen per huishouden).



Figuur 25: Kosten per huishouden voor het gehele middenspanningsnetwerk in Drechterland als functie van de geaggregeerde piekvraag (vermogen per huishouden).

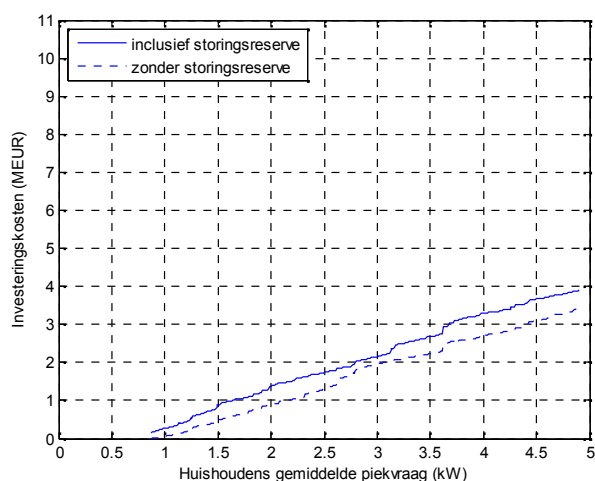
⁷⁸ Het gaat hier om de geaggregeerde vraag van de huishoudens, gedeeld door het aantal huishoudens. De daadwerkelijke individuele piek per huishouden zal hoger liggen, omdat deze pieken door geringe gelijktijdigheid in een verzameling van huishoudens wegvallen.

⁷⁹ Bij een storing zullen bepaalde delen van het net niet gebruikt kunnen worden. Hierdoor neemt het gevraagde vermogen van de werkende delen van het net toe.

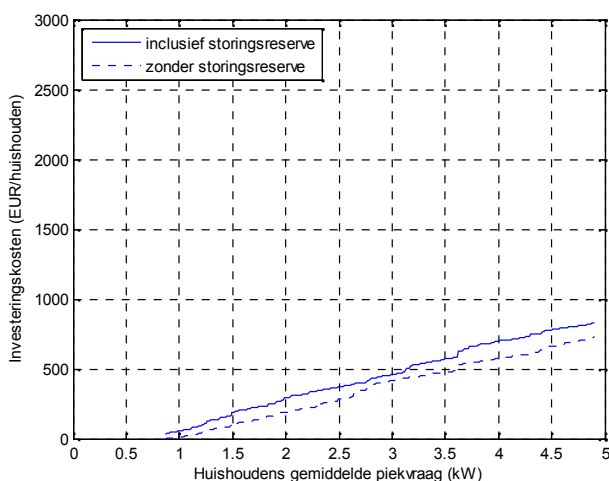
⁸⁰ Dit suggereert dat het huidige net al niet op orde is. Na validatie bij de netbeheerder blijkt dat te kloppen. In Drechterland loopt momenteel al een uitbreidingsproject (gesprek met Liander d.d. 14-10-2014).

9.1.2 Steenwijk

In de onderstaande figuren zijn de kostencurves van de casus Steenwijk weergegeven. Figuur 28 geeft de kosten als functie van de piekvraag per huishouden zonder rekening te houden met storingsreserve. Zonder storingsreserve zijn er vanaf een piekvraag van circa 0,8 kW additionele investeringen in het net nodig. De kosten lopen op tot meer dan 3 miljoen euro bij een piekvraag van 5 kW. De figuur geeft ook de kosten met inachtneming van storingsreserve. Deze situatie geeft weer welke investeringen er nodig zijn om het net dusdanig bestendig te maken dat het net ook bij een storing toereikend is. Om de piekvraag bij storingen op te vangen zijn al direct additionele investeringen in het net nodig. De kosten lopen op tot bijna 4 miljoen euro bij een piekvraag van 5 kW. Figuur 27 geeft dezelfde kosten weer, maar nu uitgezet als kosten per huishouden. De investeringen voor netverzwaringen in het middenspanningsnet zijn circa € 204 per additionele kWp per huishouden voor de bebouwde kom van Steenwijk.



Figuur 28: Kosten voor het gehele middenspanningsnetwerk in Steenwijk als functie van de geaggregeerde piekvraag (vermogen per huishouden).



Figuur 27: Kosten per huishouden voor het gehele middenspanningsnetwerk in Steenwijk als functie van de geaggregeerde piekvraag (vermogen per huishouden).

Wanneer we de beide cases vergelijken zien we dat de benodigde investeringen in casus Drechterland aanzienlijk sneller stijgen bij een toenemende piekvraag. Eén van de oorzaken hiervan is de omvang van het netwerk. Bij de casus Drechterland zijn er circa 3500 huishoudens aangesloten op een middenspanningsnet met een lengte van bijna 90 km. Bij de casus Steenwijk zijn er circa 4700 huishoudens aangesloten op een middenspanningsnet met een lengte van ruim 35 km. Ondanks het grote aantal huishoudens in de casus Steenwijk zijn de kosten beduidend lager. Deze lagere kosten hebben vooral te maken met de kortere kabels en de ruimere uitleg van het netwerk in de Steenwijk casus.

9.1.3 Laagspanningsnet

We verwachten dat het toepassen van slimme oplossingen in het laagspanningsnet geen kostenbesparing zal opleveren. Met de huidige netaanleg van het laagspanningsnet bedraagt het maximale vermogen per aansluiting gemiddeld 1,5 kW.⁸¹ Gezien deze waarde zal op de lange termijn in ieder geval een uitbreiding van het laagspanningsnet nodig zijn. Het piekvermogen in 2050 wordt in deze studie geschat op een waarde groter dan 4 kW per huishouden. Op basis van de vraagprofielen, en de mogelijke slimme oplossingen, verwachten we niet dat dit kan worden teruggebracht tot 1,5 kW. Dus ook mét slimme oplossingen is de investering voor een uitbreiding nodig, en is graven voor het leggen van nieuwe laagspanningskabels niet te voorkomen. Het opgraven en uitbreiden van de laagspanningskabels zijn verreweg de belangrijkste kosten, niet de benodigde capaciteit van de kabels. De investeringskosten met of zonder slimme oplossingen zijn dus vrijwel hetzelfde.

Een deel van het laagspanningsnet zal niet worden verzwaaard, omdat sommige laagspanningskabels zullen worden gedeeld en in nieuwe te stichten MS/LS-stations zullen worden ingevoerd. Deze uitbreidingskosten zullen dus drukken op het middenspanningsnet. In deze studie worden de investeringskosten voor het middenspanningsnet zodanig bepaald dat, als het middenspanningsnet wordt uitgebreid, het net inclusief de MS/LS-stations voldoende capaciteit heeft om alle vraag vanuit het laagspanningsnet aan te kunnen. De kosten voor nieuw te stichten MS/LS-stations worden dus verdisconteerd in de kosten van het middenspanningsnet.

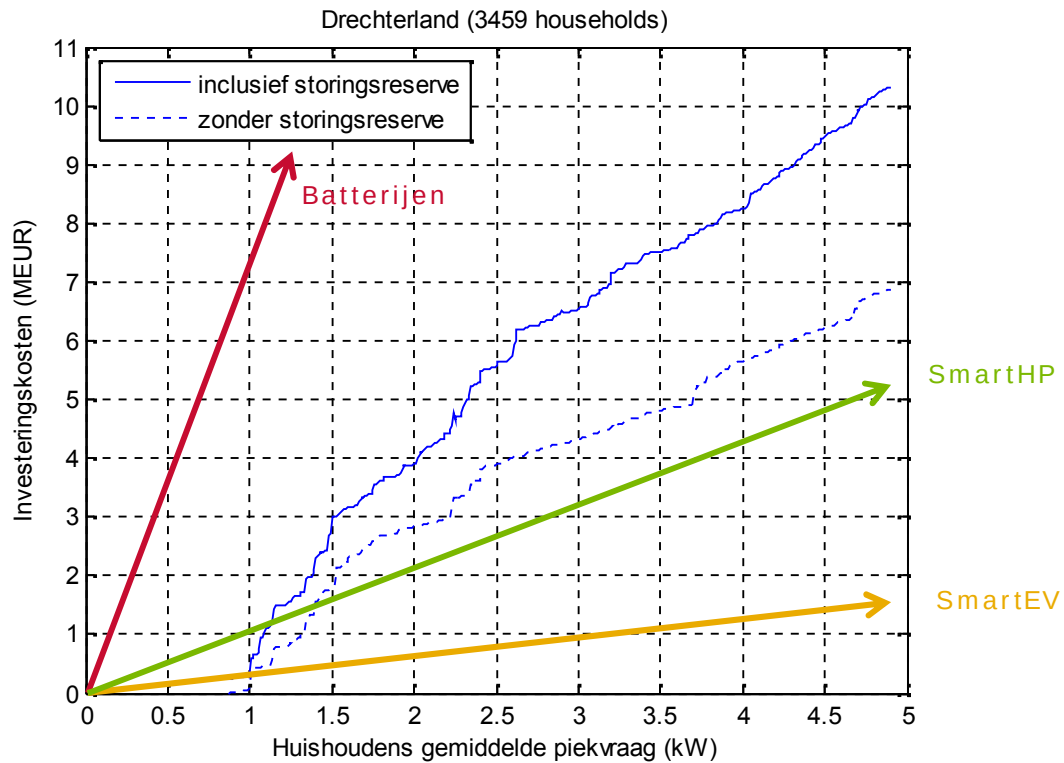
9.2 Kosten voor slimme technologieën

De globale kosten voor slimme technologieën in Sectie 8.2 kunnen gecombineerd worden met de kosten van netwerkuitbreidingen om tot een inschatting te komen van de financiële haalbaarheid van de oplossingen. De in Figuur 29 en Figuur 30 weergegeven pijlen representeren de kosten per kW van de slimme oplossingen. Wanneer de pijl onder de curve van de netinvesteringen ligt, zijn de kosten per kW voor slimme oplossingen in grote lijnen lager dan de kosten per kW voor netuitbreidingen.

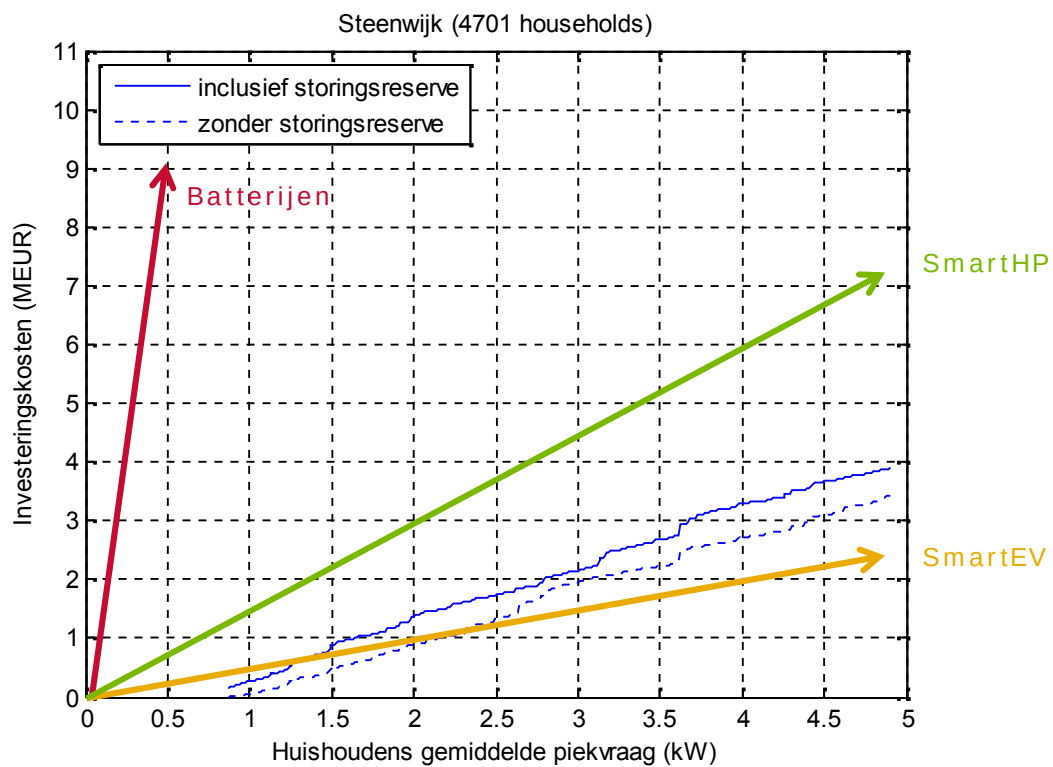
Uit onderstaande figuur blijkt dat het slimme laden (SmartEV) en het slim sturen van warmtepompen (SmartHP) rendabele opties kunnen zijn in de casus Drechterland. In Steenwijk lijkt alleen het slim laden van elektrische auto's rendabel te zijn.

Het is belangrijk te noteren dat fluctuaties in de investeringskosten per kW worden genegeerd. Dit is omdat de voorspellingen van de piekvraag en verlaging daarvan door slimme netten niet voldoende precies zijn om in die mate van detail de kosten te beoordelen. Om deze reden is gekozen om de trend van de kosten te nemen bij het kiezen van de slimme oplossingen.

⁸¹ Volgens rapport project 'Nul op de meter', Energie Consulting & Liandon



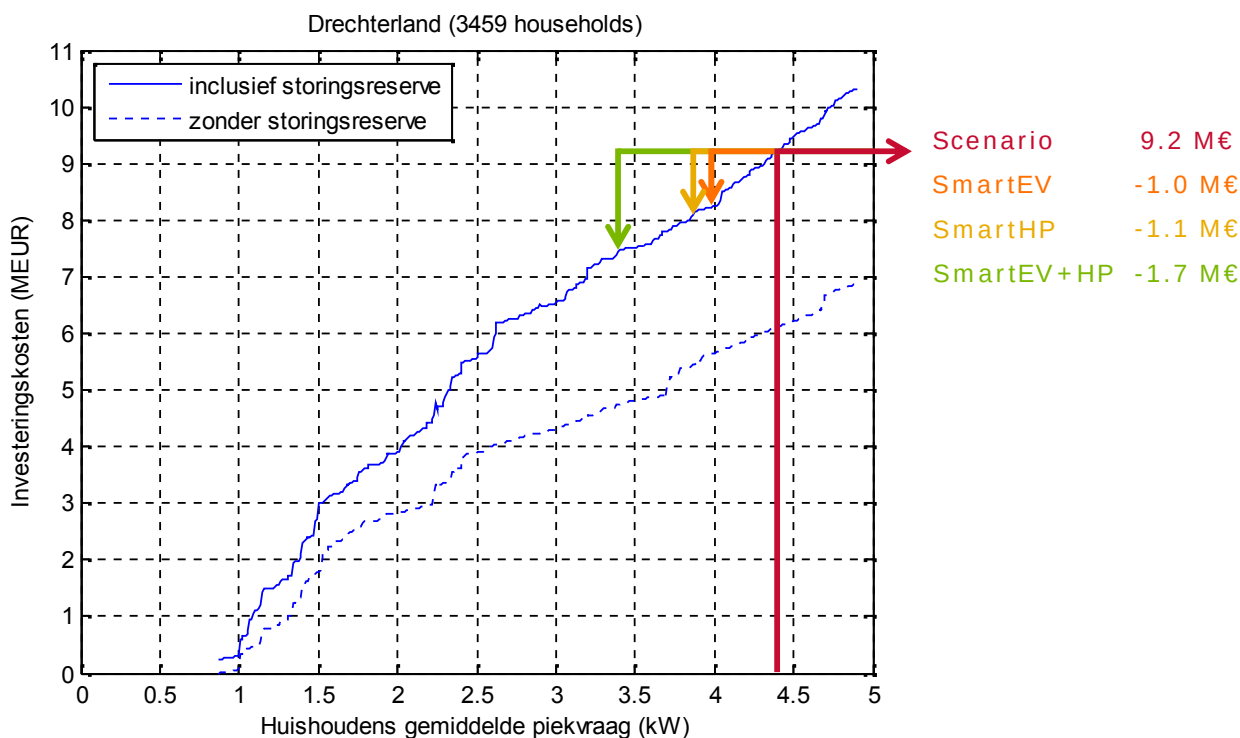
Figuur 29: Vergelijking van globale kosten voor slimme technologieën en kosten van netwerkuitbreidingen voor casus Drechterland



Figuur 30: Vergelijking van globale kosten voor slimme technologieën en kosten van netwerkuitbreidingen voor casus Steenwijk

9.3 Kosten voor netwerkaanpassingen en slimme technologieën

Op basis van de inschatting van de financiële haalbaarheid (Figuur 30) zijn de slimme oplossingen geselecteerd die worden toegepast. Op basis van deze slimme oplossingen zijn vervolgens de vraagprofielen aangepast, waarmee de maximale piekvraag lager wordt. De besparingen op netwerkaanpassingen worden vervolgens berekend op basis van de kostencurve (Figuur 31). In het voorbeeld hieronder is de kostencurve voor casus Drechterland weergegeven. In het 2050 scenario is de piekvraag 4,4 kW, resulterend in 9,2 M€ in investeringskosten voor netwerkaanpassingen. Het toepassen van slim laden (SmartEV) leidt tot een reductie van 4,4 kW naar 4,0 kW. De investeringskosten die hiermee bespaard worden bedragen 1,0 M€. Het gezamenlijk toepassen van slim laden en gestuurd verwarmen (SmartEV+HP) leidt tot een reductie van 4,4 kW naar 3,4 kW, met een bijbehorende besparing van 1,7 M€. Deze werkwijze leidt tot de kosten voor netwerkaanpassingen in het basisscenario en in de scenario's met slimme technologieën. Voor beide cases is uitgegaan van een piekverlaging van 4,4 kW naar 3,4 kW



Figuur 31: Reductie van kosten voor netwerkaanpassingen bij toepassing van slimme technologieën

Op basis van de scenarioparameters (percentage elektrische auto's en warmtepompen) en de kosten van slimme technologieën worden de totale kosten van de slimme technologieën uitgerekend. De totale kosten voor netwerkuitbreidingen en slimme technologieën worden vervolgens gecombineerd om de totale systeemkosten uit te rekenen. Om de kosten te kunnen vergelijken worden deze weergegeven als de jaarlijkse kosten.

De kosten voor het basisscenario bestaan alleen uit de kosten voor netverzwaringen en netverliezen. Uit Tabel 15 blijkt dat de kosten respectievelijk € 673.573 en € 72.138 per jaar bedragen, resulterend in een totaalbedrag van € 745.711 per jaar. Bij toepassing van slimme technologieën bedragen de kosten voor netverzwaring en netverliezen respectievelijk € 549.147 en € 85.345 per jaar en voor slimme technologieën € 32.534 per jaar, resulterend in een totaalbedrag van € 667.025 per jaar. De berekende besparingen door het toepassen van slimme oplossingen bedraagt in deze casus met dit scenario € 78.686 per jaar.

Tabel 15: Jaarlijkse kosten (€) voor netverzwaring en de kosten voor slimme oplossingen voor casus Drechterland

2050	Casus Drechterland			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	673.573	72.138	0	745.711
Slim	549.147	85.345	32.534	667.025
Verschil	-124.426	13.207	32.534	-78.686

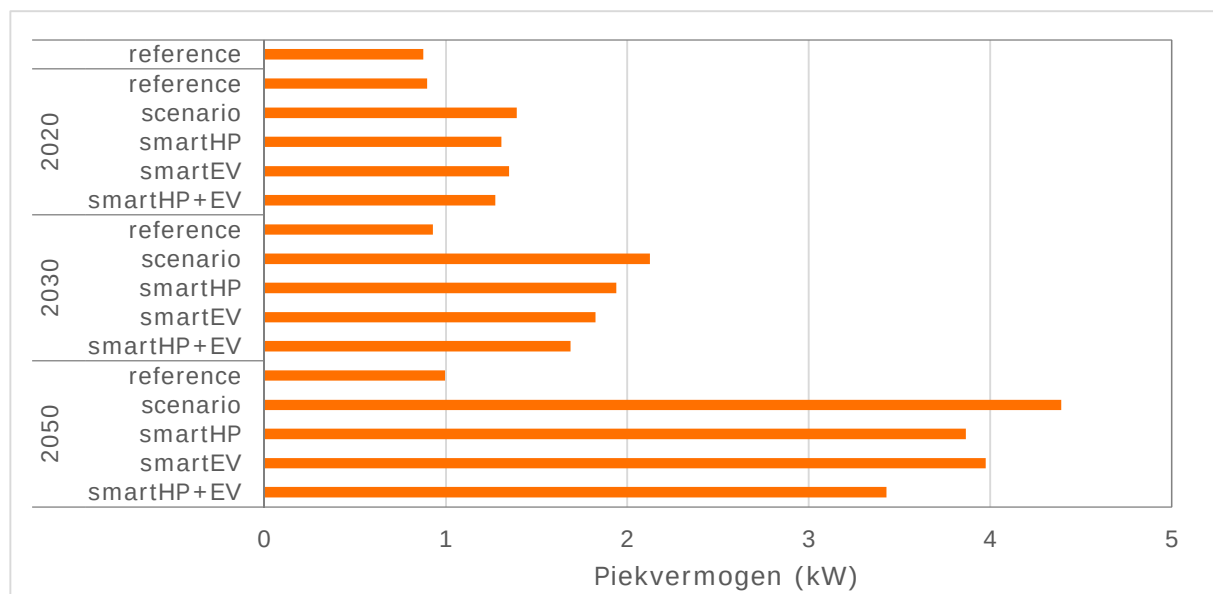
In Sectie 10 worden alle kosten voor de verschillende cases en scenario's vergeleken.

10 Uitkomsten

In deze sectie wordt een overzicht gegeven van de resultaten van dit project. De uitkomsten zijn verdeeld in een overzicht van de vraagprofielen (Sectie 10.1) en een vergelijking van de kosten van de conventionele aanpak en slimme aanpak (Sectie 10.2).

10.1 Vraagprofielen

Voorbeelden van vraagprofielen met een hoge vraagpiek en een hoge terugleverpiek zijn gegeven in Figuur 19 en Figuur 20 op pagina 24. Een samenvatting van de maximale waarden in de verschillende vraagprofielen wordt gegeven in Figuur 32. Uit deze figuur blijkt dat de verschillen tussen de huidige piekvraag en de piekvraag in 2020 relatief klein zijn door de beperkte penetratie van warmtepompen en elektrische auto's in dit jaar. Dit maakt ook de gerealiseerde besparing door slimme netten klein. In 2050 is, bij uitvoering van de beleidsambities, de piekvraag echter ongeveer vier maal groter vergeleken met de huidige situatie. Bij deze vraag kunnen slimme oplossingen de geaggregeerde piekvraag terugbrengen met ruim 1 kW gemiddeld per huishouden.



Figuur 32: Samenvatting van maximale waarden in vraagprofielen voor de verschillende scenario's

10.2 Kostenvergelijking

Zoals beschreven in Sectie 9 zijn de jaarlijkse kosten voor netwerkuitbreidingen en de jaarlijkse kosten voor slimme oplossingen berekend. De resultaten voor de verschillende cases en scenario's zijn hieronder weergegeven.

10.2.1 Drechterland

In de casus Drechterland groeien de jaarlijkse kosten door netuitbreidingen in het conventionele scenario van circa € 150.000 in 2020 tot ruim € 650.000 in 2050. In het slimme scenario bedragen deze kosten circa € 120.000 in 2020 tot circa € 550.000 in 2050. De additionele kosten voor slimme netten zijn beduidend lager dan de besparingen op netverzwaringen. De jaarlijkse besparing loopt daarom ook op van circa € 20.000 in 2020 tot circa € 80.000 in 2050. Dit resulteert in een jaarlijkse besparing van circa € 23 per huishouden per jaar.

Tabel 16: Jaarlijkse kosten van netverzwaring en slimme technologieën voor de verschillende scenario's

2020	Casus Drechterland			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	149.634	104.564	0	254.198
Slim	118.733	108.516	5.621	232.869
Vershil	-30.901	3.952	5.621	-21.329

2030	Casus Drechterland			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	310.897	83.573	0	394.470
Slim	244.632	94.726	14.167	353.525
Vershil	-66.265	11.154	14.167	-40.945

2050	Casus Drechterland			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	673.573	72.138	0	745.711
Slim	549.147	85.345	32.534	667.025
Vershil	-124.426	13.207	32.534	-78.686

10.2.2 Steenwijk

In de casus Steenwijk groeien de jaarlijkse kosten door netuitbreidingen in het conventionele scenario van circa € 50.000 in 2020 tot ruim € 250.000 in 2050. In het slimme scenario bedragen deze kosten circa € 43.000 in 2020 tot circa € 190.000 in 2050. Vanaf het 2030 scenario zijn de additionele kosten voor slimme netten zijn beduidend lager dan de besparingen op netverzwaringen. De jaarlijkse besparing loopt daarom ook op van circa € 13.000 in 2030 tot circa € 23.000 in 2050. Dit resulteert in een jaarlijkse besparing van circa € 5 per huishouden per jaar.

Tabel 17: Jaarlijkse kosten van netverzwaring en slimme technologieën voor de verschillende scenario's

2020	Casus Steenwijk			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	51.588	10.098	0	61.686
Slim	42.787	10.008	12.088	64.883
Verschil	-8.801	-90	12.088	3.197

2030	Casus Steenwijk			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	107.734	12.024	0	119.757
Slim	75.938	11.426	19.254	106.618
Verschil	-31.795	-598	19.254	-13.139

2050	Casus Steenwijk			
	Netverzwaring	Netverliezen	Slimme kosten	Totaal
Conventioneel	259.236	17.780	0	277.016
Slim	191.703	18.230	44.215	254.148
Verschil	-67.533	450	44.215	-22.868

Voor het realiseren van deze besparingen is het belangrijk dat deze overwogen worden vóórdat er geïnvesteerd wordt in netverzwaring. Deze moeten daarom niet overhaast plaatsvinden. De kosten in de curves zijn echter gebaseerd op stapsgewijze investeringen. Bij elk beslissingsmoment kan netverzwaring opnieuw tegen slimme oplossingen worden afgewogen.

10.2.3 Samenvatting

In Tabel 18 en Tabel 19 worden de resultaten uit de voorgaande paragraaf samengevat. Voor de verschillende cases en de verschillende scenario's zijn de kosten voor de conventionele aanpak en de slimme aanpak weergegeven.

Tabel 18: Samenvatting van de jaarlijkse kosten voor de conventionele aanpak en de slimme aanpak voor de verschillende cases en scenario's

Jaar	Casus Steenwijk			Casus Drechterland		
	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing
2020	61.686	64.883	-3.197	254.198	232.869	21.329
2030	119.757	106.618	13.139	394.470	353.525	40.945
2050	277.016	254.148	22.868	745.711	667.025	78.686

Tabel 19: Samenvatting van de jaarlijkse kosten per huishouden voor de conventionele aanpak en de slimme aanpak voor de verschillende cases en scenario's

Jaar	Casus Steenwijk			Casus Drechterland		
	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing	Conventioneel	Slimme oplossing	Besparing
2020	13	14	-1	73	67	6
2030	25	23	2	114	102	12
2050	59	54	5	216	193	23

10.3 Gevoeligheidsanalyse

In deze studie is ervoor gekozen met één transitiescenario te werken aan de hand waarvan de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag als gevolg van elektrische auto's, warmtepompen en zonnepanelen wordt beschreven. Voor de technische specificaties en kosten van de slimme oplossingen in de toekomst zijn noodzakelijkerwijs aannames gedaan. Deze keuzes en aannames beïnvloeden het uiteindelijke resultaat. In deze sectie wordt voor een aantal parameters beschreven in hoeverre deze invloed hebben op het eindresultaat. Er is ervoor gekozen om te onderzoeken bij welke variatie in deze aannames de waarde van slimme oplossingen negatief wordt. Voor de overwegingen bij de keuze van de geteste parameters zie Bijlage V: Gevoeligheidsanalyse.

10.3.1 Vraagprofielen

De vorm van het vraagprofiel van huishoudens in 2050 is sterk afhankelijk van toekomstige ontwikkelingen. Dit geeft een onzekerheid in de inschatting van de hoogte en de vorm van de piekvraag.

Wanneer we echter naar de kostencurves voor Drechterland (op pagina 41) en Steenwijk (op pagina 42) kijken, zien we dat de curve over het hele bereik een nagenoeg gelijke helling heeft. Dit betekent dat het relatief verlagen van de piekvraag op elk punt een vergelijkbaar effect heeft. Het veranderen van de piekvraag bij de conventionele oplossingen heeft daarmee een beperkte invloed op de uitkomsten voor de waarde van slimme netten.

De vorm van de vraagprofielen zal echter wel een effect hebben op de besparingen die de slimme oplossingen kunnen bewerkstelligen. Voor elk van de technologieën uit het transitiescenario wordt aangegeven wat de effecten kunnen zijn.

Elektrische auto's – De scenario's zijn bepalend in de hoeveelheid huishoudens die gebruik maakt van een elektrische auto. Enkel voor deze huishoudens worden investeringen voor het toepassen van slim laden berekend. Buiten de basiskosten⁸² die voor alle huishoudens in Nederland gelden, zal een lagere of hogere penetratiegraad van elektrische auto's daarom geen effect hebben op de kosten voor slimme oplossingen per vermeden kW aan netverzwaring. Dit betekent dat de waarde die gecreëerd wordt met de slimme oplossing vrijwel gelijk blijft.

Warmtepompen – Vergelijkbaar met elektrische auto's zal de technologie voor slim verwarmen ook alleen aan de orde zijn als het desbetreffende huishouden een warmtepomp heeft. De elektriciteitsvraag van warmtepompen is echter ook sterk afhankelijk van het maximum en de vorm van de warmtevraag en het type warmtepomp. Een lagere warmtevraag per huishouden zal de absolute reductie als gevolg van slim verwarmen beperken. Een vlakker warmtevraagprofiel zal een vergelijkbaar effect hebben. Een ander type warmtepomp, zoals een vloeistof-vloeistof warmtepomp met bodembron zal een hogere minimale CoP hebben. Op zeer koude dagen zal dit de rendabiliteit van slim verwarmen vergroten omdat de back-up een relatief groot deel uitmaakt van de elektriciteitsvraag van het verwarmingssysteem. De gevoeligheid voor deze veranderingen zal daarom hieronder kort onderzocht worden.

Zon PV – Bij verregaande penetratie van elektrische auto's en warmtepompen zullen zonnepanelen geen invloed hebben op de maximale piekvraag (of maximale piekproductie).

10.3.2 Kosten

De resultaten van de studie, de 'waarde van slimme netten', wordt uitgedrukt als het verschil tussen de kosten voor slimme oplossingen en de daardoor gerealiseerde besparing op netverzwarings- en netverliezen. De gevoeligheidsanalyse richt zich daarom op deze twee kostenelementen.

10.3.2.1 Kosten voor netverzwaring

Indien de kosten van netverzwaring lager worden geschat, zal dit de waarde van slimme netten verminderen. Omgekeerd zullen hogere kosten van netverzwaring leiden tot een grotere waarde van slimme oplossingen.

Tabel 20: Gevoeligheid van kostenparameters voor Drechterland en Steenwijk

Parameter	Drechterland	Steenwijk
Maximale kosten stijging slimme oplossingen	251%	56%
Maximaal vermindering van effectiviteit slimme oplossingen	70%	35%
Maximale kostendaling netverzwaring	64%	36%

⁸² Ter indicatie: de jaarlijkse basiskosten gerelateerd aan ICT voor casus Drechterland en casus Steenwijk bedragen respectievelijk circa € 5.300 en € 7.200. Zelfs bij een beperkte penetratie van elektrische auto's in 2030 zijn de besparingen van de slimme oplossingen al ruimschoots groter dan de basiskosten.

De maximale kostenstijging voor slimme technologieën waarbij er waarde voor slimme netten is, verschilt sterk per casus. Voor casus Drechterland zien we dat in 2050 de jaarlijkse kosten voor slimme technologieën € 31.716 bedragen. De jaarlijkse besparingen op de netverzwaring en netverliezen gezamenlijk bedragen € 111.222. Dit betekent dat het slimme scenario waarde creëert zolang de kosten van slimme oplossingen niet meer dan 251% stijgen.

Voor casus Steenwijk zien we dat in 2050 de jaarlijkse kosten voor slimme technologieën € 43.104 bedragen. De jaarlijkse besparingen op netverzwaring en netverliezen gezamenlijk bedragen € 67.083. Tot een kostenstijging voor slimme oplossingen van 56% zal het slimme scenario waarde hebben.

Aangezien de kostencurves voor netuitbreidingen relatief lineair verlopen, zijn vergelijkbare percentages toepasbaar op de effectiviteit van de slimme oplossingen. Voor casus Drechterland is het slimme systeem rendabel wanneer de minimale effectiviteit van de slimme oplossingen circa 30% is van de gemodelleerde effectiviteit. Voor casus Steenwijk ligt het minimale percentage op circa 65%.

Een kostendaling voor het doen van netuitbreidingen zal de waarde van een slimme oplossing in vergelijking met de conventionele oplossing verkleinen. Voor casus Drechterland is de waarde van slimme netten positief tot een kostendaling van 64%. Voor casus Steenwijk is dit 36%.

11 Conclusies

Op basis van het onderzoek kan het volgende worden geconcludeerd.

Om te voldoen aan de geformuleerde duurzaamheidsdoelstellingen neemt zowel de vraag naar elektriciteit als het aanbod van lokaal geproduceerde hernieuwbare energie toe. In het geformuleerde scenario voor 2050 met 65% elektrische auto's en 35% warmtepompen neemt de piekvraag per huishouden toe van 0,9 kW naar 4,4 kW. Deze nieuwe piekvraag vereist een verzwaring van het middenspanningsnet en daarmee samenhangende investeringen. Met deze verzwaring zou de terugleverpiek in de zomer als gevolg van zon-PV geen problemen opleveren.

Een aantal recente studies en ontwikkelingen concluderen dat het toevoegen van slimheid aan het energiesysteem, waarbij vraag en aanbod in de tijd beter op elkaar worden afgestemd, tot een lagere investeringsomvang kan leiden. In deze studie is dit op basis van praktijkcases en detailanalyse getoetst. De gekozen cases komen qua type bebouwingsdichtheid in Nederland veelvuldig voor in steden en landelijke gebieden.

De investeringen voor netverzwaringen in het middenspanningsnet verschillen sterk per casus. Deze zijn circa € 740 per additionele kWp per huishouden voor het landelijk gebied van Drechterland en circa € 204 per additionele kWp per huishouden voor de bebouwde kom van Steenwijk. Er lijkt daarmee een grote variatie in netwerkkosten per situatie te bestaan. Omdat in de studie de veranderingen in de niet-huishoudelijke vraag niet zijn meegenomen kan de werkelijke benodigde netverzwaring groter zijn.

Het slim laden van elektrische auto's en het afvlakken van de vraag voor warmtepompen op zeer koude dagen lijken de meest effectieve en efficiënte oplossingen te zijn voor het verlagen van de piekvraag in de gekozen cases. Toepassing van deze oplossingen resulteert in een piekreductie van circa 1 kW in het gedefinieerde scenario voor 2050. De piekvraag daalt hiermee van 4,4 kW naar 3,4 kW. Beide oplossingen dragen ongeveer evenveel bij. Als gevolg van deze piekreductie worden netverzwaringen niet voorkomen, maar wel beperkt. De zomerpiek kan ook in dit geval nog worden opgevangen.

Andere slimme oplossingen, zoals Power-to-Gas, vliegwielen, en slim laden en ontladen van elektrische auto's zijn in de modellering niet toegepast vanwege de hoge gerelateerde kosten of beperkte toepasbaarheid in de cases. Het sturen van witgoed als slimme oplossing viel af omdat niet zeker is dat met deze oplossing aan de eis van gelijkblijvend comfort zou worden voldaan.

Op basis van de geïdentificeerde besparingen en de kosten zien we dat in de landelijke casus van Drechterland investeringen in slim laden van elektrische auto's en sturing van warmtepompen rendabel zijn. Deze afweging heeft plaatsgevonden op basis van verwachte toekomstige kosten. Het is de verwachting dat de kosten voor slimme oplossingen door standaardisatie en opschaling sterk zullen dalen.

In Steenwijk is slim laden rendabel. Gebruik van warmtepompsturing is daar op basis van de bespaarde kosten op het middenspanningsnetwerk, onrendabel.

Gebruik van batterijen voor e-opslag is op de middellange termijn in beide cases niet rendabel als de investering in batterijen volledig wordt toegerekend aan het voorkomen van investeringen in middenspanningsnetten. Deze studie neemt de waarde die batterijen op andere wijze creëren echter niet mee, zoals opslag van zonne-energie achter de meter. Er wordt verwacht dat de investering in batterijen veel aantrekkelijker wordt als deze waarden worden meegenomen in de baten.

In Drechterland leveren de slimme oplossingen een jaarlijkse besparing in middenspanningsnetten op van €80.000 in 2050. Dit komt overeen met een besparing van circa € 23 per huishouden per jaar. In Steenwijk leveren de slimme oplossingen een jaarlijkse besparing op van € 24.000 in 2050. Dit komt overeen met een besparing van circa € 5 per huishouden per jaar. Voor beide cases is dit ongeveer 10% van de verwachte additionele kosten.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de meest gevoelige aanname de effectiviteit is van de slimme oplossingen, oftewel de piekverlaging die bereikt kan worden met een bepaalde investering in slimme netten. In het geval van Steenwijk brengt een daling van 30% van deze parameter de waarde van slimme netten tot nul terug. In Drechterland kan deze daling 70% bedragen.

Bij bestudering van het laagspanningsnet is gebleken dat slimme oplossingen niet de mate van piekreductie kunnen opleveren die netverzwarkosten kan besparen.

Op basis van de bestudeerde cases kan worden geconcludeerd dat in veel voorkomende middenspanningsnetten investeringen in slimme oplossingen terugbetaald worden met alleen al de besparingen op de middenspanningsnetten. In deze studie zijn andere opbrengsten van slimme oplossingen, zoals de inzet voor optimalisatie op de energiemarkten, niet meegenomen. Om de volledige waarde van de geanalyseerde slimme oplossingen te benoemen moeten deze voordelen worden toegevoegd. Het verdient aanbeveling om ook deze effecten nader te onderzoeken.

Het verdient aanbeveling om het gedrag van warmtepompen in extreme winteromstandigheden nader te bestuderen. Dit zou kunnen met een combinatie van praktijkervaring met een warmtepomp in een goed gerenoveerde bestaande woning en een geavanceerd thermisch model.

Daarnaast is nader onderzoek in dienstverleningsconcepten nodig die deze slimme oplossingen kunnen ontsluiten. Ook moet worden onderzocht welke marktmodellen deze dienstverleningsconcepten het beste kunnen faciliteren.

12 Bronnen

- ACM (2014) Allocatievoorwaarden gas. Beschikbaar op <https://www.acm.nl/download/documenten/acm-energie/allocatievoorwaarden-gas-2014-07-26.pdf>
- CE Delft/DNV GL (2014) Scenario-ontwikkeling energievoorziening 2030. Beschikbaar op http://www.ce.nl/publicatie/scenario-ontwikkeling_energievoorziening_2030/1490
- CE Delft (2012) Maatschappelijke kosten en baten van Intelligente Netten. Beschikbaar op http://www.ce.nl/publicatie/maatschappelijke_kosten_en_baten_van_intelligente_netten/1236
- DNV GL (2014) Integration of renewable energy in Europe. Beschikbaar op http://ec.europa.eu/energy/renewables/doc/201406_report_renewables_integration_europe.pdf
- Ecofys (2014) Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system – Interim report
- Ecofys (2014) Energy Storage – Opportunities and Challenges. Beschikbaar op <http://www.ecofys.com/en/publication/energy-storage-opportunities-and-challenges/>
- Ecofys/IEEP (2013) A cost estimation of existing gaps and barriers, pagina I-37. Beschikbaar op [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/504466/IPOL-JOIN_ET\(2013\)504466\(ANN01\)_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2013/504466/IPOL-JOIN_ET(2013)504466(ANN01)_EN.pdf)
- Ecofys (2013) Heat pump implementation scenarios until 2030. Beschikbaar op <http://www.ecofys.com/en/publication/heat-pump-implementation-scenarios-until-2030/>
- Ecofys (2011) Potenziale der Wärmepumpe. Beschikbaar op <http://www.ecofys.com/en/publication/use-of-heat-pumps-to-provide-flexibility-to-power-systems>
- Ecofys (2009) Energiebesparing- en CO₂ reductiepotentieel hybride lucht/water warmtepomp in de bestaande woningbouw. Beschikbaar op <http://www.ecofys.com/files/files/energiebespco2-spreads.pdf>
- Economic Board Utrecht (2014) Slimme laadpalen voor Lombok. Beschikbaar op <http://www.economicboardutrecht.nl/nieuws/slimme-laadpalen-voor-lombok>
- EPRI (2011) Estimating the costs and benefits of the smart grid. Beschikbaar op <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001022519>
- EDSN (2014) Profielen Elektriciteit 2013. Gedownload van <http://www.edsn.nl/verbruiksprofielen/> op 17 september 2014
- EDSN (2014) Profielen Aardgas 2013. Gedownload van <http://www.edsn.nl/verbruiksprofielen/> op 17 september 2014
- Laborelec (2009) HERMES DG3 Impact DG en 'nieuwe belastingen' op het LS- net in bestaande woonwijken
- Movares/Netbeheer Nederland (2013) Laadstrategie elektrisch wegvervoer. Beschikbaar op <https://movares.nl/project/laadstrategie-elektrisch-rijden-wegvervoer/>

- PBL/DNV GL (2014) Het potentieel van zonnestroom in de gebouwde omgeving van Nederland. Beschikbaar op <http://www.pbl.nl/publicaties/het-potentieel-van-zonnestroom-in-de-gebouwde-omgeving-van-nederland>
- PBL (2014) Op naar een klimaatneutrale woningvoorraad in 2050. Beschikbaar op <http://www.pbl.nl/publicaties/op-weg-naar-een-klimaatneutrale-woningvoorraad-in-2050>
- PBL (2012) Naar een duurzamere warmtevoorziening van de gebouwde omgeving in 2050. Beschikbaar op <http://www.pbl.nl/publicaties/2012/naar-een-duurzamere-warmtevoorziening-van-de-gebouwde-omgeving-in-2050>
- Provincie Noord-Holland (2014) Herstructurering Wind op Land Noord-Holland – Plan-MER. Beschikbaar op <http://www.noord-holland.nl/web/Projecten/Duurzame-energie/Wind/Wind-op-Land.htm>
- Provincie Overijssel (2014) Omgevingsvisie Overijssel. <http://www.overijssel.nl/thema's/ruimtelijke-ontwikke/omgeving/omgevingsvisie>. laatst bezocht op 15 oktober 2014
- Rocky Mountain Institute. (2014). The economics of grid defection when and where distributed solar generation plus storage competes with traditional utility service. Rocky Mountain Institute. Beschikbaar op http://www.rmi.org/electricity_grid_defection
- SER (2013) Energieakkoord voor duurzame groei. Beschikbaar op <http://www.energieakkoordser.nl/energieakkoord.aspx>.
- Smart Grids: Rendement voor Iedereen (2014). <http://www.smartgridrendement.nl/>
- TKI Switch2SmartGrids (2014) Projecten. <http://tki-switch2smartgrids.nl/projecten/>
- Verzijlbergh (2013) The Power of Electric Vehicles – Exploring the value of flexible electricity demand in a multi-actor context. Beschikbaar op <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:47c8faa7-94de-40fe-8be7-fccec6ee07bb/PhDthesisRemcoVerzijlbergh.pdf>

Bijlage I: Beschrijving MATPOWER

De netwerkbelasting wordt in MATPOWER gemodelleerd met de load-flow-vergelijkingen. Deze vergelijkingen beschrijven de uitwisseling van actief en reactief vermogen in een elektrisch energienet. De belangrijkste resultaten verkregen met de load-flow berekening zijn de grootte van het werkelijke en het blindvermogen in elke kabel van het netwerk en de grootte en de fasehoek van de spanning in elk knooppunt.

Input

Het inputformat van MATPOWER is in overeenstemming met IEEE standaarden. Volgens dit format wordt elektrisch net beschreven in termen van knooppunten, generatoren en kabels. Knooppunten zijn bijvoorbeeld substations waar kabels fysiek eindigen. De generatoren vertegenwoordigen de opwekking van elektrisch vermogen. De kabels vertegenwoordigen het koper dat de elektriciteit transporteert tussen knooppunten.

Het inputformat van MATPOWER is als volgt:

Voor elk knooppunt:

1. knooppunt nummer
2. werkelijk vermogen gevraagd (MW)
3. blindvermogen gevraagd (MVar)
4. spanning (kV)

Voor elke generator:

1. knooppunt nummer connectie
2. werkelijk vermogen (actief vermogen) (MW)
3. blindvermogen (reactief vermogen) (MVar)
4. maximum werkelijk vermogen

Voor elke kabel:

1. van knooppunt nummer
2. naar knooppunt nummer
3. kabellengte (km)
4. r. weerstand (Ohm/km)
5. x. reactantie (Ohm/km)
6. b. totale kabel susceptantie (μF)
7. transformator ratio
8. transformator fasehoek
9. transformator maximale belasting (MVA)
10. kabel maximale belasting (MVA)

Transformatoren worden gemodelleerd als zijnde onderdeel van een kabel. Hun aanwezigheid wordt aangegeven met de transformatorparameters van die kabel. Sommige parameters komen niet bij elk knooppunt of kabel voor en er kan worden volstaan met een standaardwaarde. (Bijvoorbeeld gevraagd vermogen = 0; of transformator ratio = 0 om aan te geven dat er geen transformator aanwezig is.)

Output

De resultaten van MATPOWER zijn in het volgende outputformat:

Voor elk knooppunt:

1. knooppunt spanning
2. knooppunt fasehoek

Voor elke generator:

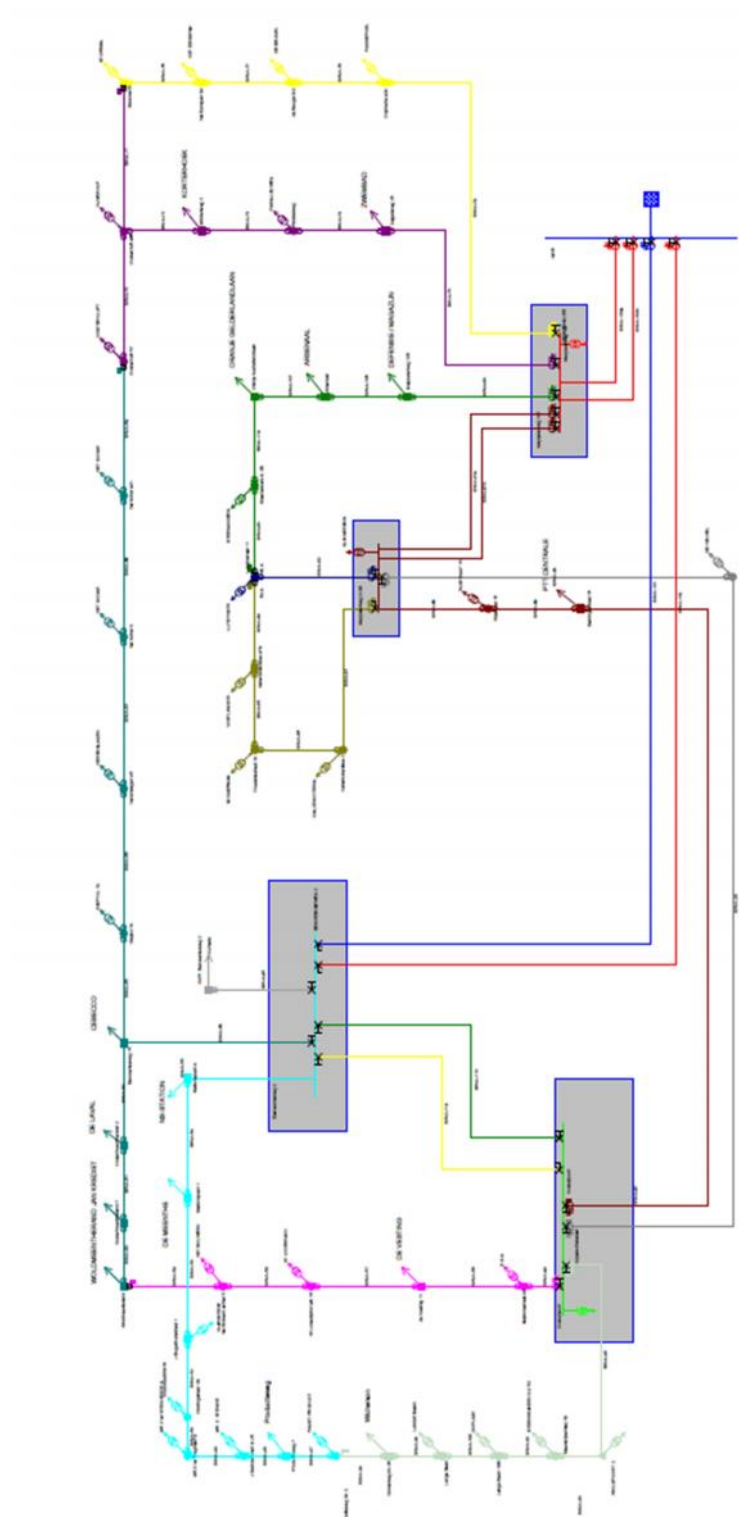
1. door generator geïnjecteerd werkelijk vermogen
2. door generator geïnjecteerd blindvermogen

Voor elke kabel:

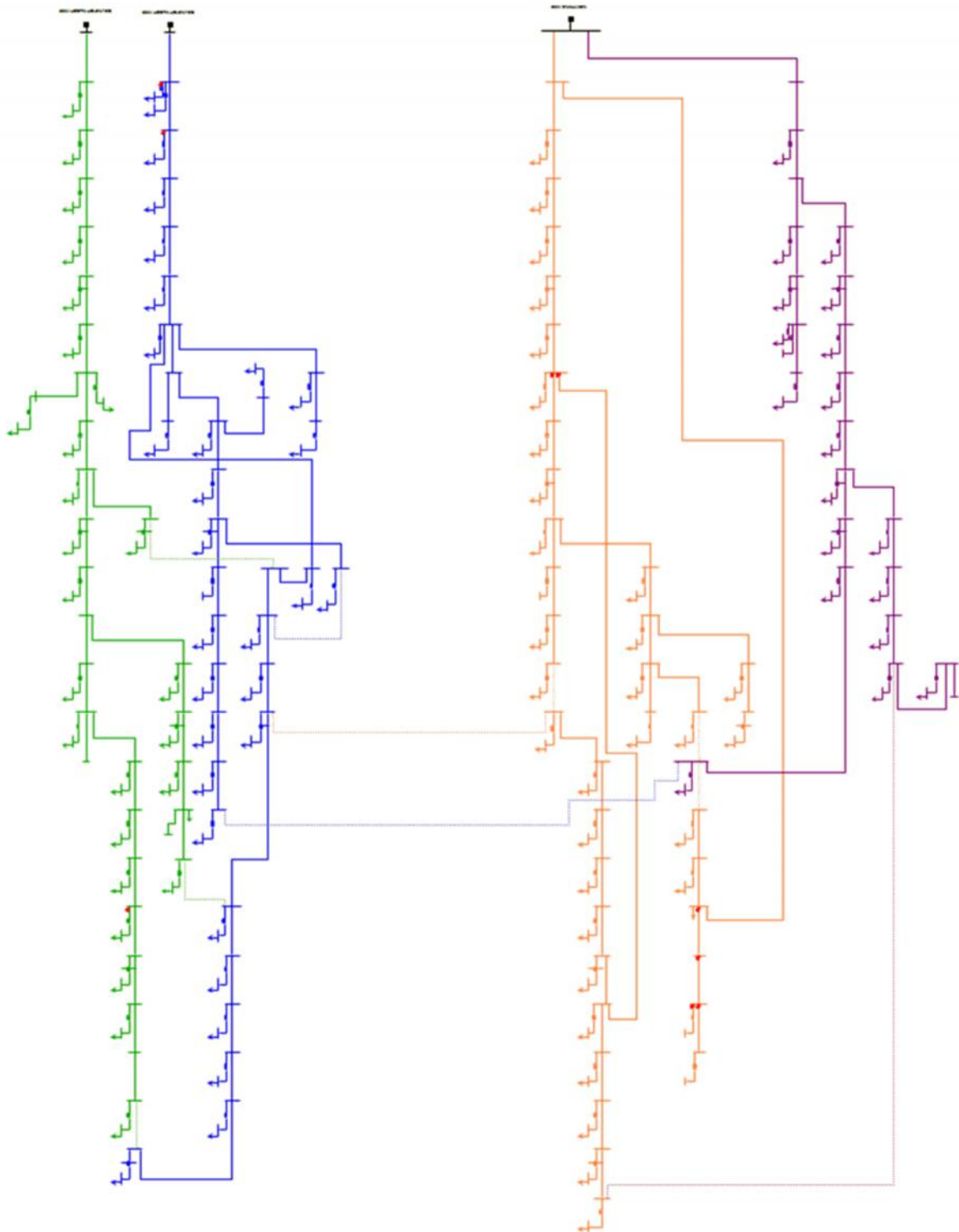
1. geïnjecteerd werkelijk vermogen
2. geïnjecteerd blindvermogen

Verdere documentatie van MATPOWER is beschikbaar op <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>.

Bijlage II: Netwerk Steenwijk

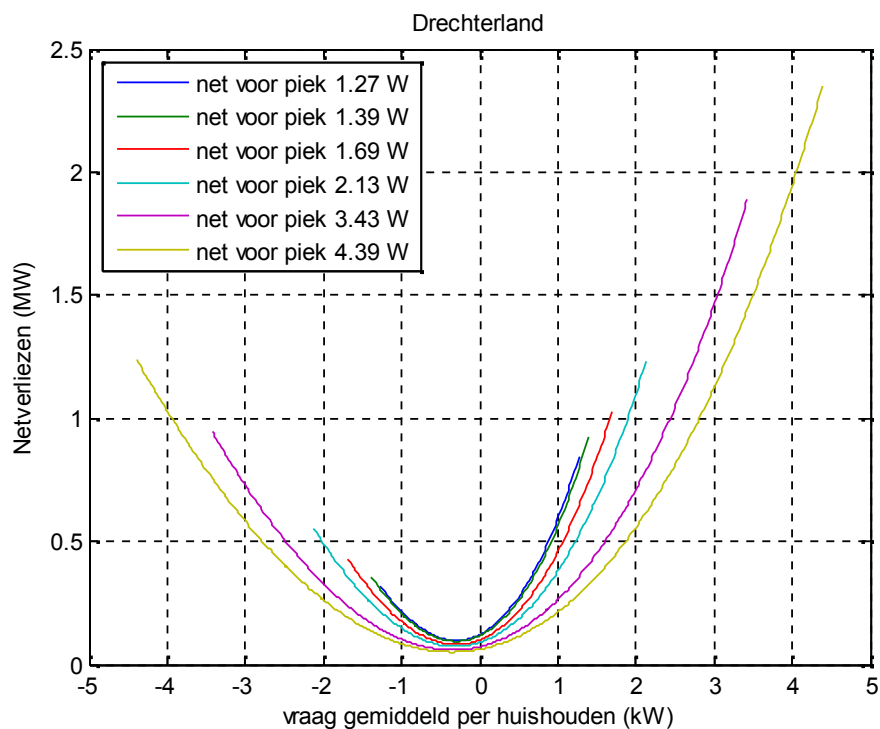
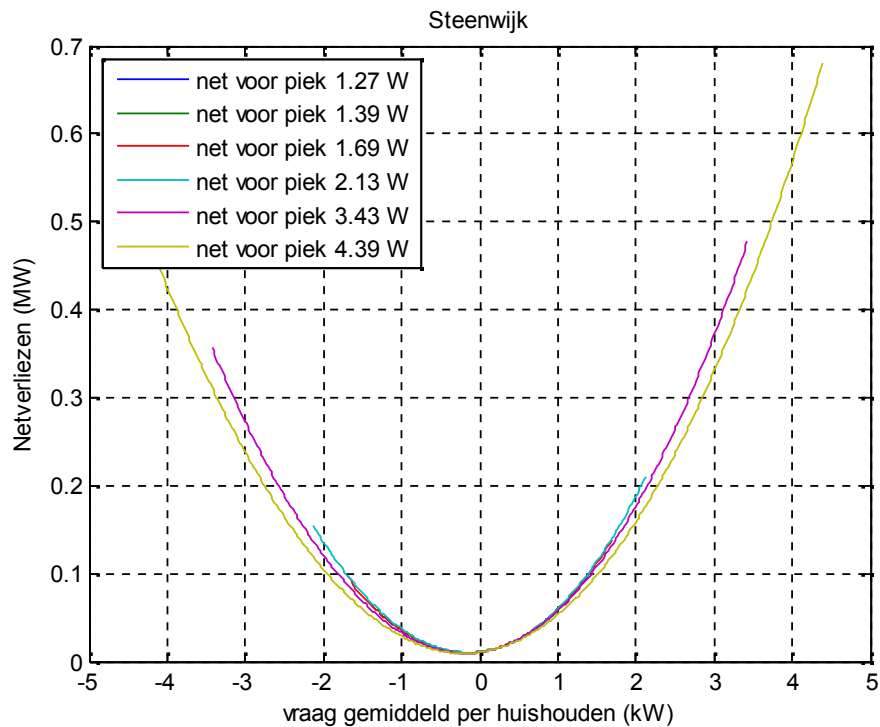


Bijlage III: Netwerk Drechterland



Bijlage IV: Berekening netverliezen

De curves in de onderstaande figuren beschrijven de relatie tussen gevraagd vermogen en de totale netverliezen in het desbetreffende net. Omdat de netverliezen zijn afhankelijk van de capaciteit van het net (de dikte van de kabels) worden er curves gegeven voor verschillende piekwaarden.



Bijlage V: Gevoeligheidsanalyse

In de onderstaande tabel wordt een beschrijving gegeven van de onzekerheid van verschillende aannames. De onzekerheid wordt geschaald met – (beperkt) tot ++ (groot). Verder wordt er een vermoeden van invloed van elk van de aannames beschreven. Bij grote onzekerheid en grote invloed is de invloed van de variatie in de aanname nader onderzocht in de gevoeligheidsanalyse zoals weergegeven in Sectie 10.3.

Input/aanname	Onzekerheid	Vermoeden van invloed	Nader onderzocht
Transitiescenario			
Jaarlijkse groei elektriciteitsvraag	++	Directe invloed op maximale elektriciteitsvraag. Impact zal beperkt zijn omdat de toekomstige basisvraag beperkt is ten opzichte van de totale vraag als gevolg van elektrische auto's en warmtepompen.	Nee
Jaarlijkse groei van warmtevraag	+	Indirecte invloed op de elektriciteitsvraag van warmtepompen. Een grotere reductie van de warmtevraag zal leiden tot een beperktere toepasbaarheid van slim verwarmen.	Nee
Vermogen PV	+	Zeer beperkte invloed op maximale elektriciteitsvraag. Directe invloed op maximale terugleverpiek. Impact zal beperkt zijn omdat de vraagpiek als gevolg van elektrische auto's en warmtepompen groter is dan de terugleverpiek.	Ja
Aandeel elektrische auto's	+	Directe invloed op maximale elektriciteitsvraag, beperkte invloed op waarde van slimme netten.	Nee
Aandeel warmtepompen	++	Directe invloed op maximale elektriciteitsvraag, beperkte invloed op waarde van slimme netten.	Nee
Basisvraag			
Jaarverbruik elektriciteit	-	Beperkte invloed. Onzekerheid in jaarlijkse groei heeft groter effect.	Nee
Jaarverbruik aardgas	-	Beperkte invloed. Onzekerheid in jaarlijkse groei heeft groter effect.	Nee
Warmtepomp			
Thermische capaciteit	+	Beperkte invloed omdat bij zeer lage temperaturen de CoP van warmtepompen de efficiëntie van de back-up nadert.	Nee

Input/aanname	Onzekerheid	Vermoeden van invloed	Nader onderzocht
CoP	+	De CoP bij zeer lage temperaturen heeft een directe invloed op de elektriciteitsvraag van warmtepompen. Keuze voor een ander type warmtepomp (bijvoorbeeld een warmtepomp met bodembron) kan de maximale elektriciteitsvraag sterk beïnvloeden. Bij een hogere minimale CoP zal het effect van slim verwarmen echter toenemen doordat het gebruik van de back-up een relatief groter impact heeft op het vraagprofiel.	Nee
Back-up efficiëntie	0	Beperkt vergeleken met impact van CoP bij lage temperaturen. Wel van invloed op het effect van slim verwarmen.	Nee
Vorm van warmtevraag	++	Invloed op maximale elektriciteitsvraag en mogelijkheden voor slim verwarmen als gevolg van profiel warmtevraag.	Nee
Verliezen bij slim verwarmen	++	Invloed op maximale reductie in elektriciteitsvraag van warmtepompen.	Nee
EV			
Vraagprofiel	+	Vraagprofiel is afkomstig uit bestaande studies. Hoogte van vraagprofiel afhankelijk van de energievraag per dag (nu ca. 6 kWh).	Nee
PV			
Jaarlijkse productie per geïnstalleerd vermogen	0	Invloed vergelijkbaar met geïnstalleerd vermogen, zeer beperkte invloed op maximale elektriciteitsvraag	Nee
Kosten			
Kapitaalkosten	+	Beperkte invloed op kosten. Vergelijkbare impact voor zowel kosten voor huishoudens en kosten voor het netwerk.	Nee
Kosten voor slimme oplossingen	++	Grote invloed op eindresultaat omdat een kleine verandering in jaarlijkse kosten grote invloed heeft op het resultaat over een periode van 40 jaar.	Ja
Kosten voor netwerkuitbreidingen	0	Beperkte invloed op netwerkkosten.	Ja



sustainable energy for everyone



ECOFYS Netherlands B.V.

Kanaalweg 15G
3526 KL Utrecht

T: +31 (0) 30 662-3300

F: +31 (0) 30 662-3301

E: info@ecofys.com

I: www.ecofys.com